



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Regulace teploty vody na výstupu tepelného zdroje směřováním
při dodržení žádané teploty ve vzdáleném odběrovém místě**

**Temperature control of water on output heat source by blending
at compliance with a control point temperature at a remote place
of demand**

Liberec 2004

Michal Mikeš

Anotace

Cílem diplomové práce je naprogramování regulátoru, navrženého vhodnou metodou, pro zadanou soustavu s velkým dopravním zpožděním (i několik minut), kde se směřováním, horké vody na výstupu tepelného zdroje a ochlazené vratné vody, udržuje žádaná teplota ve vzdáleném odběrovém místě.

Soustava je aproximována přenosem prvního nebo druhého řádu se zpožděním. Vybrané metody návrhu struktury a parametrů regulátoru pro tyto soustavy s velkým dopravním zpožděním jsou: metoda inverze přenosu soustavy, metoda optimálního modulu, metoda vnitřního modelu, Smithův prediktivní regulátor, modifikovaný Smithův prediktivní regulátor.

Nejlépeších výsledků bylo dosaženo se Smithovým a modifikovaný Smithovým prediktivním regulátorem, které jsme realizovali modulárním programovatelným automatem Modicon Quantum firmy Schneider Electric.

Annotation

The aim of the diploma thesis is to program the regulator, designed by the suitable method for a given system with big time delay (minutes), where by mixing the hot water on the output of the heat source and cooled water returning to the system a desired temperature is stabilized at a remote place of demand.

The system is approximated by transfer the first or second degree with a delay. The methods used for designing the structure and parameters of the regulators with the big time delay are: method of inverting of transfer function, method of optimum module, internal model control, Smith predictor control, modified Smith predictive control.

The best results were accomplished by Smith's and modified Smith's predictive regulator which we realized through the medium of modular programmable automat Modicon Quantum by Schneider Electric company.

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Obsah

Zadání.....	2
Anotace.....	3
Annotation	3
Prohlášení	4
Obsah.....	5
Použité symboly	7
1 Úvod	8
2 Model regulované soustavy s dopravním zpožděním	10
2.1 Popis regulované soustavy a dopravního zpoždění.....	10
2.1.1 Blokové schéma regulované soustavy.....	10
2.1.2 Dopravní zpoždění v řízených procesech.....	11
2.2 Identifikace modelu soustavy	12
2.2.1 Simulační model směšování	4
2.2.2 Identifikace přenosu soustavy s dopravním zpožděním.....	14
3 Metody návrhu regulátoru	17
3.1 Metoda inverze dynamiky	18
3.2 Metoda optimálního modulu	19
3.3 Metoda vnitřního modelu	23
3.4 Smithův prediktivní regulátor	26
3.5 Modifikace Smithova regulátoru	28
4 Srovnání jednotlivých metod návrhu regulátorů	31
4.1 Model odpovídá regulované soustavě	32
4.2 Regulace při větším dopravním zpoždění	34
4.3 Model neodpovídá regulované soustavě	36
4.4 Regulace se šumem na regulované veličině	41
4.5 Odchylka modelu směšování.....	42
4.6 Přehled nastavení parametrů regulátorů při simulacích	47

5 Realizace regulátoru programovatelným automatem.....	48
5.1 Modulární systém Modicon Quantum.....	48
5.1.1 Analogové vstupy / výstupy regulátoru a jejich zapojení	49
5.1.2 Konfigurace řídicí jednotky 140 CPU 113 02 v Conceptu XL	50
5.2 Programová realizace regulačních metod.....	51
5.2.1 Smithův prediktivní regulátor	52
5.2.2 Modifikovaný Smithův regulátor	53
5.3 Ověření regulátorů řízením modelu soustavy.....	55
5.3.1 Model soustavy, nastavení a zapojení regulátoru.....	55
5.3.2 Ověření funkce regulátoru na modelu soustavy s dopravním zpožděním a směřováním	57
6 Závěr.....	60
7 Použitá literatura.....	63
8 Popis adresářů obsažených na příloženém CD.....	64

Použité symboly

n	Řád soustavy
k_I	Statické zesílení soustavy
T_I	Časová konstanta soustavy
τ	Dopravní zpoždění soustavy
$G(s)$	Obrazový přenos soustavy se zpožděním
$\tilde{G}(s)$	Stabilní (invertovatelná) část přenosu soustavy $G(s)$
$G_D(s)$	Neinvertovatelná část přenosu soustavy $G(s)$
$u(t)$	Akční veličina
$d(t)$	Poruchová veličina
$y(t)$	Regulovaná veličina
$w(t)$	Žádaná hodnota regulované veličiny
$h(t)$	Přechodová funkce
$J(k_I, T_I, \tau)$	Kriteriální funkce
DN	Světlost potrubí
L	Délka potrubí (od směšovače k výměníku)
k_p	Proporcionální zesílení PID regulátoru
T_I	Integrační časová konstanta PID regulátoru
T_D	Derivační časová konstanta PID regulátoru
$R(s)$	Přenos regulátoru
a, β, χ	Koeficienty pro výpočet regulátoru metodou inverze přenosu
$G_w(s)$	Přenos uzavřené regulační smyčky
$G_0(s)$	Přenos otevřené smyčky regulačního obvodu
$R^*(s)$	Regulační část přenosu regulátorů s obecnou strukturou
$F(s)$	Přenos dolnoproustního filtru
G_0^*	Přenos otevřené regulační smyčky bez dopravního zpoždění
$T_{I\text{Zdr}}$	Teplota vody na vstupu do tepelného zdroje
$T_{O\text{Zdr}}$	Teplota vody na výstupu z tepelného zdroje
$T_{O\text{S}}$	Teplota vody na výstupu ze směšovacího ventilu
$T_{I\text{Vym}}$	Teplota vody na vstupu do výměníku tepla
m	Objemový průtok vody soustavou
m_Z	Objemový průtok vody zkratem

1 Úvod

V oblasti řízení byl vždy problém regulace soustav s dominantním dopravním zpožděním. V praxi nejčastěji používané PID regulátory se experimentálně dají jen obtížně seřídit. Zpětná vazba uzavřené regulační smyčky obecně zhoršuje stabilitu soustavy (kmitavá odezva, nestabilní). Jsou známé i metody nastavení parametrů PID regulátorů pro soustavy se zpožděním (inverze dynamiky, optimální modul a další - [1], [2]), ale i zde se musíme spokojit s malými akčními zásahy vedoucími k pomalejším odezvám regulované veličiny a pro opravdu velké dopravní zpoždění (řádově minuty) jsou nepoužitelné. Proto firma Warmnis spol. s r.o., zabývající se regulační a automatizační technikou, zadala tuto diplomovou práci, ve které se zabýváme regulací soustavy s velkým dopravním zpožděním směřováním.

Lepších výsledků regulace, než s klasickými PID, lze dosáhnout s obecnějšími regulátory, které ve své struktuře obsahují model regulované soustavy - metoda vnitřního modelu [2], či Smithův prediktivní regulátor [4], kde se jedná o rozšíření standardních PID regulátorů, které navrhl v roce 1957 O. J. M. Smith - při úplné shodě modelu s regulovanou soustavou, dosáhneme eliminace dopravního zpoždění. Existují i různé odvozené metody návrhu Smithova regulátoru, např. v roce 1998 uvedla Vítečková [3] modifikaci Smithova regulátoru, ten již model regulované soustavy neobsahuje, což v praxi znamená nastavování menšího počtu parametrů, větší robustnost na neshodu modelu a regulované soustavy. Dále lze použít i modernější návrhy prediktivních regulátorů pro systémy s dopravním zpožděním, jako je například metoda FSA (Finite Spectrum Assignment Control) [7] a další. Tyto metody ovšem nejsou v praxi příliš rozšířené, pro jejich složitou strukturu a realizaci, může za to také nedostatek srozumitelně popisující literatury.

V této diplomové práci se nejprve budeme zabývat vytvořením modelu a identifikací naměřených dat na reálné regulované soustavě, kde teplotu vody ve vzdáleném odběrovém místě řídíme nastavením otevření třicestného směšovacího ventilu, který směšuje horkou vodu ze zdroje a chladnější vratnou vodu z odběrového výměníku. Další části jsou zaměřeny na návrh regulátoru výše

zmíněnými metodami pro danou soustavu s velkým dopravním zpožděním a simulacím v programovém prostředí Matlabu 5.3, kde ověříme funkčnost a robustnost jednotlivých metod na změnu parametrů regulované soustavy. Poslední část je věnována softwarovému řešení vybraného regulátoru pro programovatelný modulární systém Modicon Quantum, zapůjčený firmou Schneider Electric, a ověření jeho funkce na modelu simulovaného v Matlabu 5.3 na PC s měřicí kartou PCLD – 8710. Závěr obsahuje shrnutí výsledků našeho řešení.

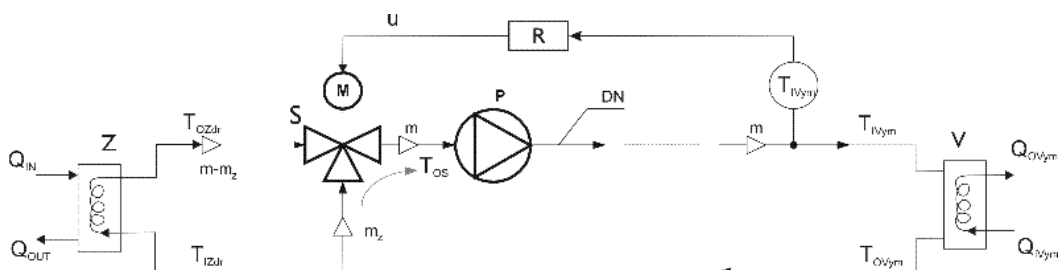
2 Model regulované soustavy s dopravním zpožděním

V této kapitole rozebereme a popíšeme zadanou regulovanou soustavu na blokovém schéma, pak definujeme dopravní zpoždění a jeho popis pomocí Laplaceovy transformace. Dále provedeme identifikaci modelu soustavy s dopravním zpožděním z naměřených dat a sestavíme kompletní simulační model soustavy se směřováním.

2.1 Popis regulované soustavy a dopravního zpoždění

2.1.1 Blokové schéma regulované soustavy

Na *Obrázku 2.1* je soustava, kde se reguluje na žádanou hodnotu teploty vody T_{IVym} na vstupu do výměníku V , z kterého se odebírá teplo, ochlazené médium se opět vrací zpět do tepelného zdroje Z , kde se ohřívá na teplotu T_{OZdr} , zdroj předpokládáme dostatečně tvrdý (s autonomní regulací), aby udržel konstantní teplotu na jeho výstupu.



Z	... Tepelný zdroj
S	... Směšovací ventil
M	... Pohon směšovacího ventilu
P	... Čerpadlo
V	... Výměník tepla
R	... Regulátor
Q_{IN}	... Tepelná energie zdroje pro ohřev vody
Q_{OUT}	... Výstupní tepelná energie ze zdroje ohřevu vody
T_{IZdr}	... Teplota vody na vstupu do tepelného zdroje
T_{OZdr}	... Teplota vody na výstupu z tepelného zdroje
T_{OS}	... Teplota vody na výstupu ze směšovacího ventilu
T_{IVym}	... Teplota vody na vstupu do výměníku tepla
T_{OVym}	... Teplota vody na výstupu z výměníku tepla
m	... Objemový průtok vody soustavou
m_z	... Objemový průtok vody zkratem
$m-m_z$... Objemový průtok vody ze zdroje
Q_{OVym}	... Tepelná energie výstupu z výměníku
Q_{IVym}	... Tepelná energie vstupu do výměníku

Obrázek 2.1 - Blokové schéma regulované soustavy

Regulace se realizuje třicestným směšovacím ventilem S , ve kterém se do horké vody ze zdroje přimíchává chladnější vratná voda. Vzdálenost mezi akčním členem a spotřebičem tepla je přitom významná, teplo se přenáší průtokem m řádově v $10^1 - 10^2 \text{ m}^3/\text{h}$. Z toho plyne, že se jedná o soustavu s dopravním zpožděním. Průtok vody m se mění čerpadlem P (na *Obrázku 2.1*) v závislosti na odběru tepla, tlaku v potrubí, ročním období, venkovní teplotě, atd. To způsobuje změnu dopravního zpoždění a tím se zvyšují nároky na regulátor a jeho robustnost.

Dobu přenosu tepla rychlostním průtokem, neboli dopravní zpoždění, lze poměrně přesně vypočítat vztahem

$$\tau[s] = \frac{V}{m} = \frac{0,0036 \cdot \pi \cdot DN^2[mm] \cdot L[m]}{m \left[\frac{m^3}{h} \right]} \quad (2-1)$$

kde L je délka potrubí, DN světlost (průměr) a m je objemový průtok.

Tepelná bilance směšovacího ventilu

$$T_{OS} \cdot m = T_{OZdr} \cdot (m - m_z) + T_{IZdr} \cdot m_z \quad (2-2)$$

kde T_{OS} je teplota za směšovacím ventilem, T_{OZdr} teplota vody ze zdroje, T_{IZdr} teplota vody vstupující do zdroje, m je objemový průtok vody potrubím, $(m - m_z)$ průtok vody ze zdroje a m_z je průtok vody zkratem.

2.1.2 Dopravní zpoždění v řízených procesech

Dopravní zpoždění je obecně definováno jako časové posunutí mezi určitou příčinou a jejím důsledkem, [2]. Systémy se zpožděním se vyskytují nejen v regulaci procesů přenosu tepla, na které je zaměřena tato diplomová práce, ale také v dálkové kontinuální přepravě tekutin a sypkých materiálů, v chemických a hutních procesech a při dálkovém ovládání objektů.

V matematickém modelu zpoždění znamená časové posunutí, proto obvyklým modelem jsou diferenciální rovnice s posunutím v argumentu. Pro lineární modely systémů se zpožděním je velmi účinný nástroj popisu Laplaceova transformace, které využíváme při popisu regulované soustavy.

Problém dopravního zpoždění v regulační smyčce je ovšem řešen již od počátků moderní teorie řízení, tj. od padesátých let. Průkopníkem řešení je uznáván O. J. M. Smith (1957) [4] a jeho myšlenka kompenzace zpoždění v regulátoru je i v současnosti v různých modifikacích využívána. Podíl zpoždění na dynamice procesů lze obecně shrnout do jednoho bloku dopravního zpoždění, který pak je sériově spojen s modelem s výhradně akumulací strukturou. Budeme uvažovat lineární model daný přenosem (2-1) s $n = 1$ a $n = 2$

$$G(s) = \frac{k_1}{(T_1 s + 1)^n} e^{-\tau s} \quad (2-3)$$

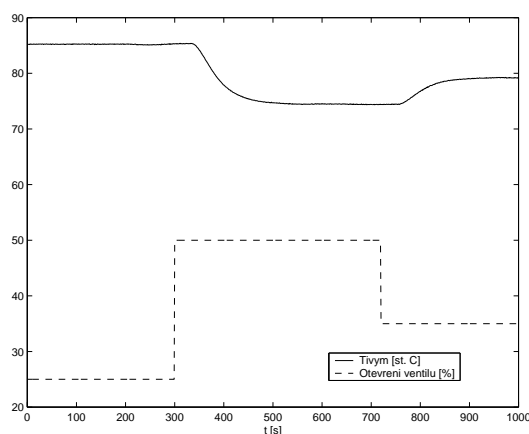
Předpokladem tohoto modelu je, že veškerý účinek různých zpoždění, rozložených parametrů, atd. je možné shrnout do působení vstupu zpožděného o τ , a další zpoždění v modelu již neuvažujeme. Ve skutečnosti se zpoždění neuplatňují jen v působení vstupů, ale i ve zpětných vazbách, to je v tomto modelu nahrazováno zvyšováním jejich řádu. Tento řád je pak náhradní aproximací vlivu vnitřních zpoždění a rozložených parametrů.

2.2 Identifikace modelu soustavy

Charakteristika pro identifikaci modelu byla naměřena na reálné soustavě v teplárně v Polských Świebodzicích na výstupu horkovodního kotle při odpojeném stávajícím regulátoru. Směšovací ventil byl nastaven v čase (t_0 je čas počátku měření) $t_0 + 5$ min. z 25% otevření ventilu na 50% a v čase $t_0 + 12$ min. na 35%, což se projevilo změnou teploty v odběrovém místě. Měření probíhalo při $T_{Izdr} = 55^\circ \text{C}$, $T_{Ozdr} = 90^\circ \text{C}$, $m = 197 \text{ m}^3/\text{h}$.

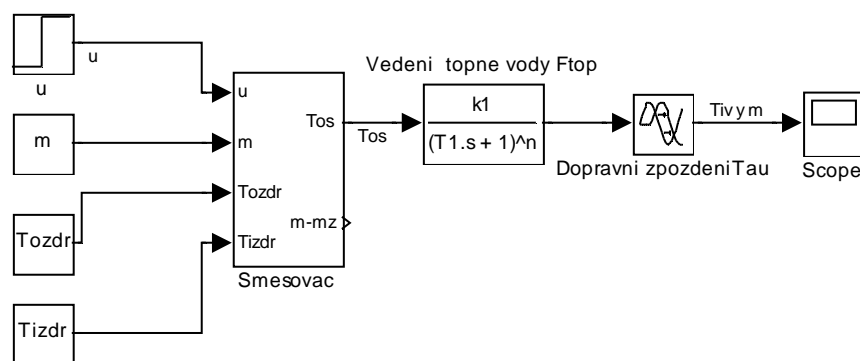
Z takto naměřených charakteristik ventilu a sestavit model směšování (Obrázek 2.2) nelze přímo identifikovat vody.

model soustavy, jelikož se ukázalo, při simulacích, že směšovací ventil není zcela lineární a neznáme výstupní teplotu ze směšovacího ventilu T_{os} , kterou nelze měřit. Bylo nutné zjistit směšovací charakteristiku použitého



Obrázek 2.2 - Naměřená charakteristika

Výsledný model soustavy se pak skládá ze tří částí *Obrázek 2.3* : směšování (nonlinearita + tepelná bilance směšovacího ventilu), přenosu 1., resp. 2. řádu, a dopravního zpoždění (tepelné ztráty + zpoždění).

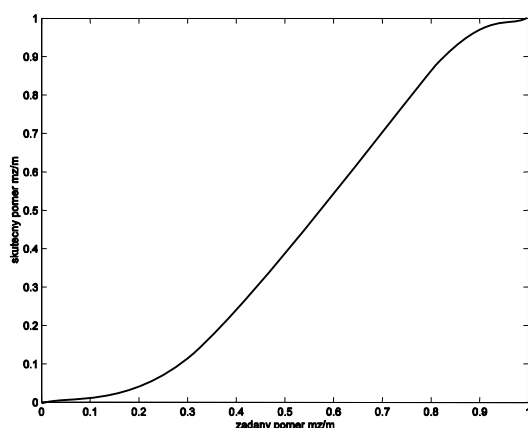


Obrázek 2.3- Model soustavy se směšovačem

2.2.1 Simulační model směšování

Na ventilu se nastavením polohy Na směšovacím ventilu platí tepelná rotační směšovacího elementu mění bilance (2-2).

průtok vody ze dvou vstupů dle křivky směšovací charakteristiky (*Obrázek 2.4*). Požadované teploty vody je dosaženo přimícháním části vratné vody do horké ze zdroje. Pro dosažení optimální regulace se ventil vyznačuje speciální směšovací charakteristikou.

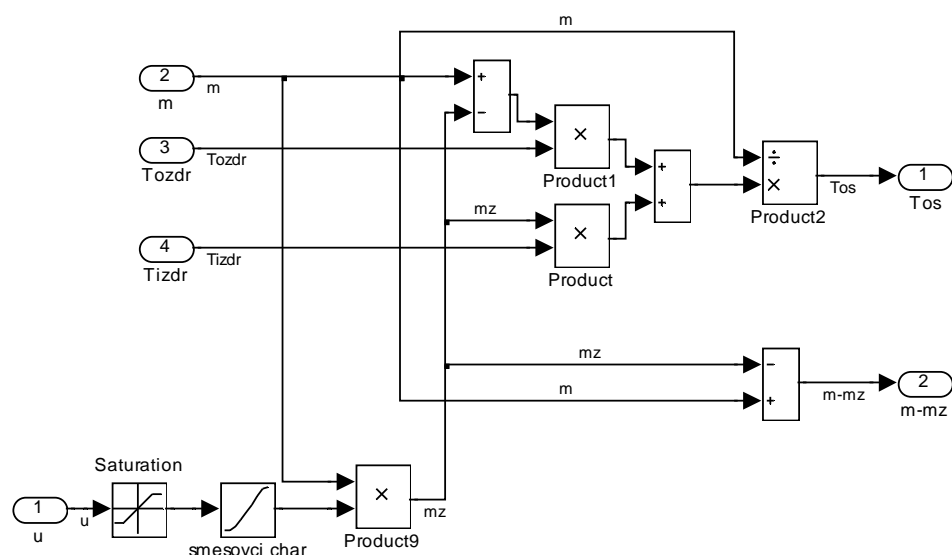


Obrázek 2.4 – Statická směšovací charakteristika ventilu (odvozená ze směšovací char. z url: http://www.honeywell.cz/home/Html_h/pohony.htm)

Akční veličinou směšovače je ovládán motor ventilu, který nastavuje směšovací element tak, aby průtok vody za směšovacím ventilem odpovídal požadavku poměru průtoku horké a vratné vody $u = m_z / m$, kde u je akční veličina směšovače. Nelinearita je typu omezení akční veličiny v rozsahu 0 – 100%.

Pomocí modelu směšování lze následně identifikovat konkrétní parametry přenosu (2-3) 1., resp. 2. řádu z měření na soustavě.

Směšovacímu ventilu odpovídá schéma na *Obrázku 2.5*, kde řídicí veličina je omezena saturačním blokem, výstup je pak transformován směšovací charakteristikou a převeden na teplotu pomocí rovnice tepelné bilance směšovacího ventilu (2-2).



Obrázek 2.5 - Simulační schéma třícestného směšovacího ventilu

2.2.2 Identifikace přenosu soustavy s dopravním zpožděním

Pro identifikaci zesílení přenosu soustavy se zpožděním z měření, je nutné ze simulací na modelu směšovacího ventilu, zjistit výstupní teplotu, odpovídající T_{os} , kterou z technologických důvodů nelze přímo měřit na regulované soustavě.

Akční veličina u	25 %	50 %	35 %
Měřená $T_{IVym}(\infty)$	85,2° C	74,5° C	79,3° C
Simulovaná T_{os}	86,5° C	75,0° C	79,3° C

Tabulka 2.1 - Teplota T_{os} odpovídající otevření ventilu v ustáleném stavu

Hodnoty T_{os} pak odpovídají akční veličině vstupující do identifikovaného přenosu se zpožděním.

Z hodnot T_{os} byla provedena identifikace parametrů přenosu 1. řádu, resp. 2. řádu, se zpožděním ve tvaru (2-3), minimalizací kvadratického kritéria (2-4), použitím funkce dostupné v Matlabu $fminsearch()$.

Minimalizované kritérium

$$J = \sum_{k=1}^N v_{ki}^2 = \sum_{k=1}^N (\Delta y_{ki} - h_i \Delta u_k)^2 \quad (2-4)$$

v_{ki} je šumová složka i -té pořadnice v k -tém měřicím cyklu, Δy_{ki} je změřená pořadnice se šumovým signálem odpovídající teplotě T_{IVym} , h_i je i -tá pořadnice hledané přechodové funkce a Δu_k změna akční veličiny v k -tém měřicím cyklu odpovídající teplotě T_{os} . Kde $i = 0, 1, 2, \dots, M$; $k = 1, 2$.

Program použitý při identifikaci přenosu soustavy je na příloženém CD v adresáři *\Identifikace modelu*.

Velikost dopravního zpoždění $\tau = 34.5$ s, lze spočítat z rovnice (2-1) (platí pro přenos 1. řádu), pro parametry regulované soustavy $DN = 200$ mm, $L = 15$ m, $m = 97$ m³/h, v tomto případě byl při měření poměrně vysoký průtok ($m \in <30; 250>$ m³/h), dopravní zpoždění může dosahovat až 4 min.

Výsledný identifikovaný přenos 1. řádu se zpožděním pak je ve tvaru

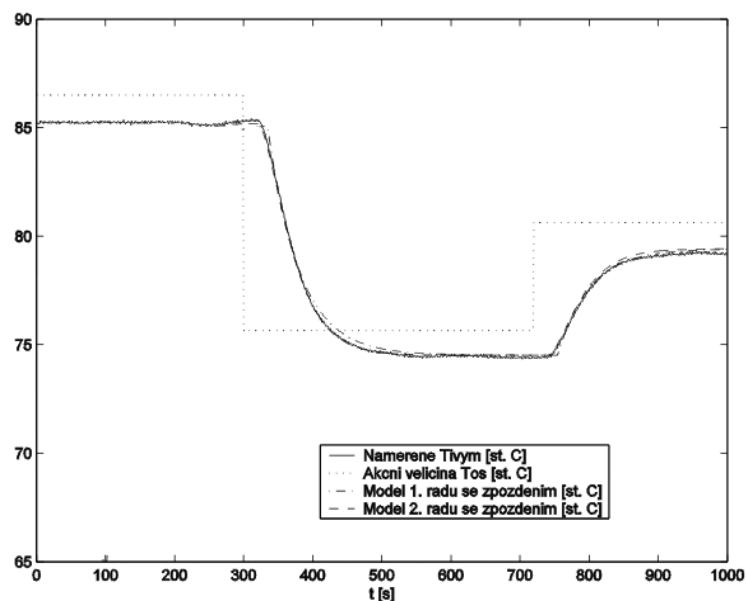
$$G(s) = \frac{0.985}{46.2s + 1} e^{-35s} \quad (2-5)$$

nebo přenos 2. řádu se zpožděním

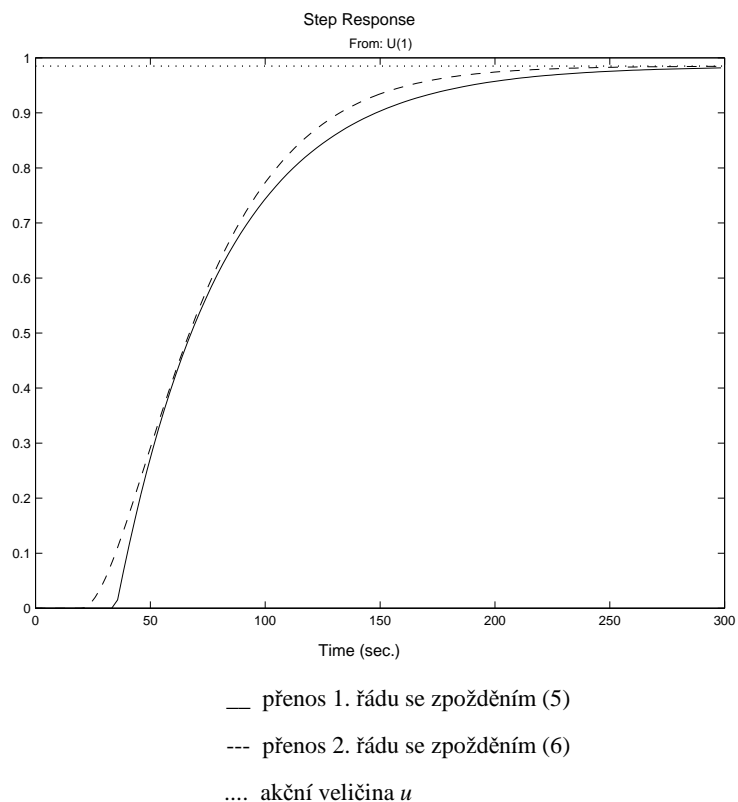
$$G(s) = \frac{0.985}{(27.6s + 1)^2} e^{-20s} = \frac{0.985}{762.5s^2 + 55.3s + 1} e^{-20s} \quad (2-6)$$

Identifikované dopravní zpoždění u přenosu 2. řádu (2-6) se liší od vypočítaného podle (2-1). To proto, že přechodová charakteristika přenosu 2. řádu (2-6) má pozvolnější náběh, proto identifikované dopravní zpoždění je menší než u (2-5).

Simulované průběhy se od měřeného nepatrně odlišují (*Obrázek 2.6*), to je dáno odchylkami mezi reálným směšovacím ventilem a jeho modelem. Bohužel statickou směšovací charakteristiku (*Obrázek 2.4*) nelze v reálu na soustavě odměřit, proto je experimentálně volená s přihlédnutím na předpokládaný průběh.



Obrázek 2.6 – Srovnání naměřeného a simulovaného průběhu

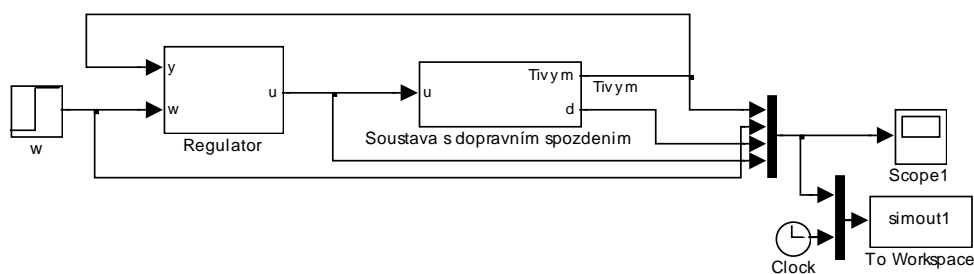


Obrázek 2.7 – Přechodové charakteristiky identifikovaných přenosů

Nyní lze sestavit simulační model celé regulované soustavy, spojením simulačního modelu směšování a bloku s odpovídajícím přenosem s dopravním zpožděním.

3 Metody návrhu regulátoru

Pro zjednodušení, návrh regulátoru realizujeme pro identifikovaný přenos soustavy 1. řádu (2-5), resp. 2. řádu (2-6), s dopravním zpožděním bez směšování. Simulace však už provádíme na modelu soustavy se směšováním *Obrázek 3.1*.



Obrázek 3.1 - Simulační schéma s regulací na žádanou hodnotu

Na *Obrázku 3.1* v bloku *Regulator* je struktura konkrétního regulátoru, *Soustava s dopravním zpožděním* obsahuje model regulované soustavy z *Obrázku 2.3*, kde navíc je aditivní poruchová veličina d na vstupu do přenosu soustavy, která simuluje změnu např. průtoku, teploty horké vody, teploty vratné vody a jiné poruchové vlivy. Struktura regulátoru je rozšířena o inverzní směšovací charakteristiku, která výstup z regulátoru převádí na akční veličinu symbolizující otevření ventilu 0 – 100 %.

Návrh regulátoru provedeme metodami použitelnými pro soustavy s velkým dopravním zpožděním, které je v našem případě až 4 minuty. Pro řízení této soustavy jsme vybrali dvě metody návrhu parametrů PID regulátorů (metoda inverze dynamiky, metoda optimálního modulu) a tři metody návrhu regulátorů obecné struktury (metoda vnitřního modelu, Smithův prediktivní regulátor, Smithův modifikovaný regulátor).

Existuje ale mnohem více různých technik seřízení PID regulátorů např. Ziegler-Nichols atd. [5], které v této práci nebudeme uvažovat. Zaměříme se spíše na regulátory obecné struktury, těch je v dostupné literatuře popsáno také více, např. metoda FSA (Finite Spectrum Assignment Control) [7] a různé modifikace Smithova prediktivního regulátoru, ovšem z nedostatku času a dostupných dokumentů, popisujících tyto metody návrhu, je nerealizujeme. Další modernější metody návrhu prediktivních regulátorů, které jsme se pokusili realizovat byli:

metoda GPC (Generalised Predictive Controller) [7] a metoda DMC (Dynamic Matrix Control) [5], ale jak se při realizaci ukázalo tyto metody si neporadí s dopravním zpožděním větším než jednotky sekund, proto návrh těchto regulátorů zde neuvádím.

Simulační programy a schémata naleznete na přiloženém CD v adresáři \Simulace regulátorů v Matlabu 5.3\.

3.1 Metoda inverze dynamiky

Tato metoda, je použitelná pro lineární spojité i diskrétní regulační obvody. Metoda umožňuje snadné a rychlé seřízení PID regulátorů pro standardní typy regulovaných soustav i s dopravním zpožděním. Typ regulátoru je doporučen z hlediska vlastností regulované soustavy a požadavku na nulovou trvalou regulační odchylku způsobenou skokovou změnou polohy žádané veličiny, resp. poruchy působící na výstupu regulované soustavy. Pro regulované soustavy s dopravním zpožděním ($\tau > 0$) zvolíme požadovaný překmit χ ($0 \leq \chi \leq 0,5$) přechodové charakteristiky uzavřeného regulačního obvodu a podle hodnoty překmitu určíme parametr a , viz *Tabulka 3.1*. Návrh dále provedeme podle Wagnerová, Minář [1].

$$a = \frac{1}{\beta\tau} \quad (3-1)$$

χ	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
β	2,718	1,944	1,72	1,561	1,437	1,337	1,248	1,172	1,104	1,045	0,992

Tabulka 3.1 - Hodnoty koeficientů podle [1]

Podle tvaru přenosu regulované soustavy určíme doporučený typ regulátoru a odpovídající hodnoty jeho stavitelných parametrů, viz *Tabulka 3.2*.

Regulovaná soustava	Doporučený typ regulátoru	k_p^* $\tau > 0$	T_I^*	T_D^*
$G(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-\tau}$	PI	$a T_I^*/k_1$	T_I	-
$G(s) = \frac{k_1}{(T_1 s + 1)^2} e^{-\tau} = \frac{k_1}{T_1^2 s^2 + 2T_1 s + 1} e^{-\tau}$	PID	$a T_I^*/k_1$	$2T_I$	$T_I/2$

Tabulka 3.2 - Parametry pro návrh analogového regulátoru podle [1]

Přenos regulátoru typu PI

$$R(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (3-2)$$

Přenos regulátoru typu PID

$$R(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (3-3)$$

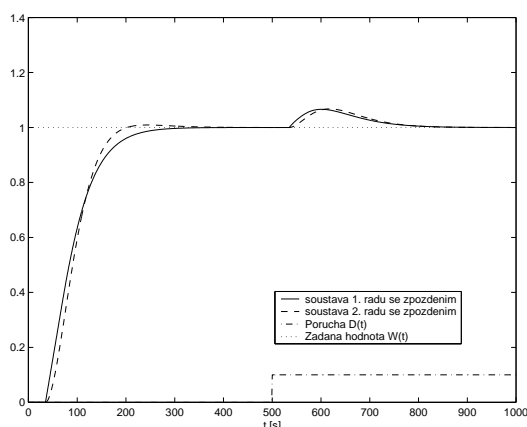
Výsledný přenos regulátoru $R(s)$ tedy je:

- 1) Pro identifikovaný přenos (5), 1. řádu se zpožděním:

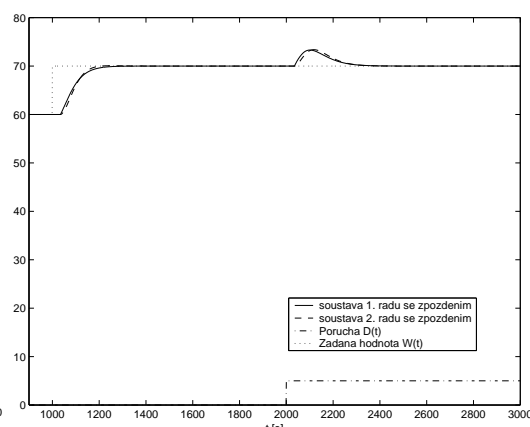
$$R(s) = 0.49 \left(1 + \frac{1}{46.2s} \right) \quad (3-4)$$

- 2) Pro identifikovaný přenos (6), 2. řádu se zpožděním:

$$R(s) = 1.03 \left(1 + \frac{1}{55.2s} + 13.8s \right) \quad (3-5)$$



Obrázek 3.2 - Regulace modelu bez směšovače
(inverze dynamiky)



Obrázek 3.3 - Regulace modelu se směšovačem
(inverze dynamiky)

3.2 Metoda optimálního modulu

Touto metodou se nastavují PID regulátory, pro řízení soustav nejen s dopravním zpožděním. Metoda vychází ze skutečnosti, že maximum na frekvenční amplitudové charakteristice $A_w(\omega) = |G_w(\omega)|$ signalizuje rezonanční jev, tj. náchylnost uzavřeného regulačního obvodu k málo tlumeným kmitům. Pro optimální přechodný děj vyplývá, aby amplituda $A_w(\omega)$ se pokud možno v co největším rozsahu frekvencí blížila jedné a aby monotónně klesala bez rezonance.

Podobný průběh musí mít i druhá mocnina $A_w^2(\omega) \rightarrow 1$. Metoda je odvozena z podmínky minima kvadratické regulační plochy. Návrh provedeme podle Wagnerová, Minář [1].

Je-li přenos řízení ve tvaru

$$G_w(s) = \frac{b_ms^m + \dots + b_1s^1 + b_0}{a_ns^n + \dots + a_1s^1 + a_0} \quad (3-6)$$

pak

$$A_w^2(j\omega) = G_w(j\omega)G_w(-j\omega) = \frac{B_m\omega^{2m} + \dots + B_1\omega^2 + B_0}{A_n\omega^{2n} + \dots + A_1\omega^2 + A_0} \quad (3-7)$$

Nezávislost absolutní hodnoty frekvenčního přenosu na kmitočtu dostaneme, když stupeň čitatele bude roven stupni jmenovatele a platí

$$\frac{B_0}{A_0} = \frac{B_1}{A_1} = \dots = \frac{B_i}{A_i} \quad (3-8)$$

Tuto podmínku většinou nelze splnit. Proto vystačíme s podmínkou

$$A_i B_0 = A_0 B_i \quad i = 1, \dots, a \quad (3-9)$$

kde a je počet stavitelných parametrů regulátoru.

Součinitelé A_i , B_i jsou funkcemi stavitelných parametrů regulátoru, rovněž tak i a_i , b_i . Řešením těchto vztahů získáme hodnoty stavitelných parametrů regulátoru.

V praxi je výhodné použít již vypočítaných hodnot stavitelných parametrů regulátoru pro vybrané charakteristické soustavy.

- 1) Regulovaná soustava 1. řádu se zpožděním $G(s) = \frac{k_1}{T_1s+1} e^{-\tau s}$:

Přenos je nutné aproximovat Pádeho rozvojem prvního řádu

$$G(s) = \frac{k_1}{T_1s+1} e^{-\tau s} \approx \frac{k_1 \left(1 - \frac{\tau}{2}s\right)}{(T_1s+1) \left(1 + \frac{\tau}{2}s\right)} \quad (3-10)$$

Přenos regulátoru $R(s)$ volíme typu PI a bude ve tvaru:

$$R(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (3-11)$$

Přenos otevřené smyčky regulačního obvodu

$$G_0(s) = G(s) R(s) \quad (3-12)$$

$$G_0(s) = \frac{k_1 k_p (1 + T_I s) \left(1 - \frac{\tau}{2} s \right)}{(T_I s + 1) \left(1 + \frac{\tau}{2} s \right) T_I s} = \left| \underline{T_I^* = T_I} \right| = \frac{k_1 k_p \left(1 - \frac{\tau}{2} s \right)}{\left(1 + \frac{\tau}{2} s \right) T_I s} \quad (3-13)$$

Stupeň astatismu $q = 1$

Přenos řízení

$$G_w(s) = \frac{G_0(s)}{1 + G_0(s)} = \frac{-k_1 k_p \frac{\tau}{2} s + k_1 k_p}{\frac{\tau T_I}{2} s^2 + s \left(-k_1 k_p \frac{\tau}{2} + T_I \right) + k_1 k_p} \quad (3-14)$$

Vyjádření a dosazení koeficientů A_i , B_i do vztahu $A_i B_0 = A_0 B_i$ a výpočet parametrů regulátoru

$$\begin{aligned} A_0 &= (k_I k_p)^2 & B_0 &= (k_I k_p)^2 \\ A_1 &= \left(-k_1 k_p \frac{\tau}{2} + T_I \right)^2 - 2k_1 k_p \frac{\tau T_I}{2} & B_1 &= \left(-k_1 k_p \frac{\tau}{2} \right)^2 \end{aligned} \quad (3-15)$$

Z rovnosti (3-9) plyne

$$\left(-k_1 k_p \frac{\tau}{2} + 1 \right)^2 - 2k_1 k_p \frac{\tau T_I}{2} = \left(-k_1 k_p \frac{\tau}{2} \right)^2 \quad (3-16)$$

$$\underline{\underline{k_p^* = \frac{T_I}{2k_1\tau}}} \quad (3-17)$$

Vypočítané parametry PI regulátoru pro přenos odpovídající (2-5):

$$\boxed{R(s) = 0.67 \left(1 + \frac{1}{46.2s} \right)} \quad (3-18)$$

2) Regulovaná soustava 2. řádu se zpožděním $G(s) = \frac{k_1}{(T_1 s + 1)^2} e^{-\tau s}$:

Přenos je nutné aproximovat Pádeho rozvojem prvního řádu

$$G(s) = \frac{k_1}{T_1^2 s^2 + 2T_1 s + 1} e^{-\tau s} \approx \frac{k_1 \left(1 - \frac{\tau}{2} s\right)}{\left(T_1^2 s^2 + 2T_1 s + 1\right) \left(1 + \frac{\tau}{2} s\right)} \quad (3-19)$$

Přenos regulátoru $R(s)$ volíme PID ve tvaru:

$$R(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right) \quad (3-20)$$

Přenos otevřené smyčky regulačního obvodu

$$G_0(s) = \frac{k_1 k_p \left(1 + \frac{\tau}{2} s\right) \left(1 + T_I s + T_I T_D s^2\right)}{\left(T_1^2 s^2 + 2T_1 s + 1\right) \left(1 + \frac{\tau}{2} s\right) T_I s} = \left| \begin{array}{l} T_I^* = 2T_1 \\ T_I T_D = T_1^2 \\ T_D^* = \frac{T_1}{2} \end{array} \right| = \frac{k_1 k_p \left(1 - \frac{\tau}{2} s\right)}{2T_1 s + \tau T_1 s^2} \quad (3-21)$$

Stupeň astatismu $q = 1$

Přenos řízení

$$G_w(s) = \frac{G_0(s)}{1 + G_0(s)} = \frac{-k_1 k_p \frac{\tau}{2} s + k_1 k_p}{\tau T_1 s^2 + s \left(-k_1 k_p \frac{\tau}{2} + 2T_1\right) + k_1 k_p} \quad (3-22)$$

Vyjádření a dosazení koeficientů B_i do vztahu $A_i B_0 = A_0 B_i$ a výpočet parametrů regulátoru

$$\begin{aligned} A_0 &= (k_1 k_p)^2 & B_0 &= (k_1 k_p)^2 \\ A_1 &= \left(-k_1 k_p \frac{\tau}{2} + 2T_1\right)^2 - 2k_1 k_p \tau T_1 & B_1 &= \left(-k_1 k_p \frac{\tau}{2}\right)^2 \end{aligned} \quad (3-23)$$

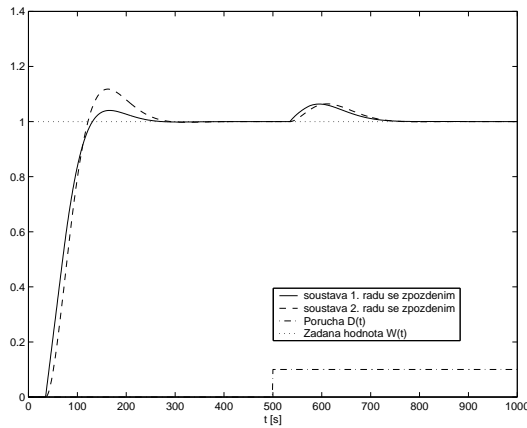
Z rovnosti $A_I B_0 = A_0 B_I$ dostaneme

$$\left(2T_1 - k_1 k_p \frac{\tau}{2}\right)^2 - 2k_1 k_p T_1 \tau = \left(-k_1 k_p \frac{\tau}{2}\right)^2 \quad (3-24)$$

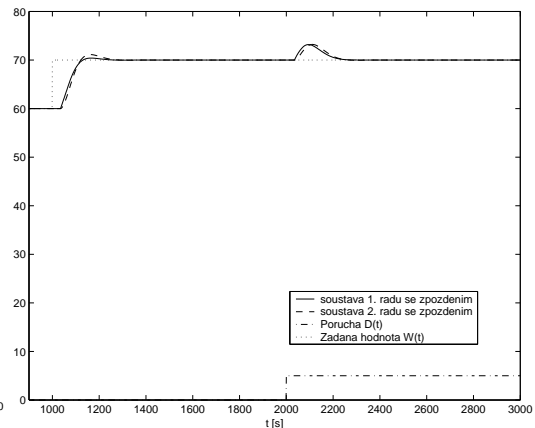
$$\underline{\underline{k_p^* = \frac{T_1}{k_1 \tau}}} \quad (3-25)$$

Přenos PID regulátoru pro identifikovaný přenos odpovídající (2-6):

$$\boxed{R(s) = 1.40 \left(1 + \frac{1}{55.2s} + 13.8s\right)} \quad (3-26)$$



Obrázek 3.4- Regulace modelu bez směšovače (optimální modul)



Obrázek 3.5 - Regulace modelu se směšovačem (optimální modul)

3.3 Metoda vnitřního modelu

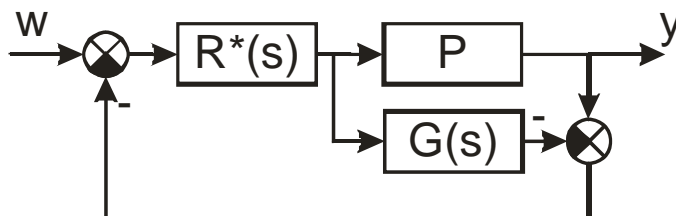
Návrh řízení, který využívá tzv. vnitřního modelu (Internal Model Control, IMC) podle Zítek, Víteček [2], který v 80. letech publikovali Morari, Rivera a Zafiriou. V tomto návrhu regulátoru se pracuje s inverzí přenosu procesu, proto je nutné část, která je neinvertovatelná (dopravní zpoždění), oddělit. Pak přenos procesu bude uvažován jako součin obou přenosů

$$G(s) = \tilde{G}(s) G_D(s) \quad (3-27)$$

kde $G_D(s)$ je vyčleněné zpoždění, popř. kořenové činitele odpovídající nestabilním nulám $G(s)$. Blokové schéma s regulátorem je znázorněno na *Obrázku 13*.

Přenos regulátoru $R(s)$

$$R(s) = \frac{R^*(s)}{1 - R^*(s)G(s)} \quad (3-28)$$



Obrázek 3.6 - Blokové schéma řízení s vnitřním modelem

Člen $R^*(s)$ se navrhuje jako

$$R^*(s) = \frac{1}{\tilde{G}(s)} F(s) \quad (3-29)$$

kde $F(s)$ je vhodný dolnoproustní filtr, zajišťující realizovatelnost $R^*(s)$.

V návrhu je uplatněna operace zpoždění ve struktuře regulátoru. Návrh složitějších přenosových funkcí s sebou nese snížení robustnosti, resp. větší citlivost na odchylky mezi modelem a dynamickým procesem.

- 1) Regulovaná soustava 1. řádu se zpožděním $G(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-\tau s}$:

Rozdělení přenosu soustavy $G(s) = G_D(s) \tilde{G}(s)$ na

$$G_D(s) = e^{-\tau s}, \quad \tilde{G}(s) = k_1 / (T_1 s + 1) \quad (3-30)$$

Volba dolnoproustního filtru

$$F(s) = \frac{1}{T_F s + 1} \quad (3-31)$$

Člen

$$R^*(s) = \frac{F(s)}{\tilde{G}(s)} = \frac{T_1 s + 1}{k_1 (T_F s + 1)} \quad (3-32)$$

Přenos regulátoru pak tedy bude

$$R(s) = \frac{R^*(s)}{1 - R^*(s)G(s)} = \frac{T_1 s + 1}{k_1(T_F s + 1 - e^{-\tau s})} \quad (3-33)$$

Po dosazení parametrů odpovídající identifikovanému přenosu (2-5) a $T_F = 20s$:

$$R(s) = \frac{46.2s + 1}{0.985(20s + 1 - e^{-35s})} \quad (3-34)$$

2) Regulovaná soustava 2. řádu se zpoždění $G(s) = \frac{k_1}{(T_1 s + 1)^2} e^{-\tau s}$:

Rozdělení přenosu soustavy $G(s) = G_D(s) \tilde{G}(s)$ na

$$G_D(s) = e^{-\tau s}, \quad \tilde{G}(s) = k_1 / (T_1 s + 1)^2 \quad (3-35)$$

Volba dolnoproustního filtru

$$F(s) = \frac{1}{(T_F s + 1)^2} \quad (3-36)$$

Člen

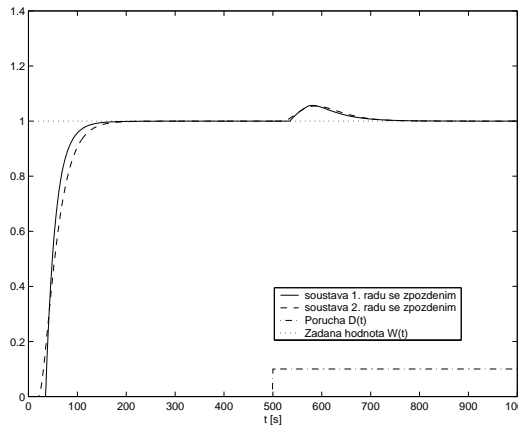
$$R^*(s) = \frac{F(s)}{\tilde{G}(s)} = \frac{(T_1 s + 1)^2}{k_1 (T_F s + 1)^2} \quad (3-37)$$

Přenos regulátoru pak tedy bude

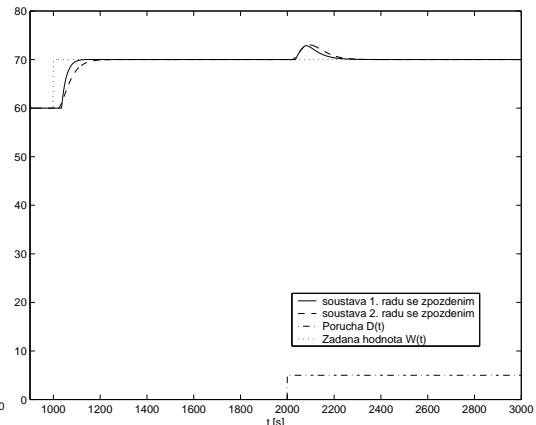
$$R(s) = \frac{R^*(s)}{1 - R^*(s)G(s)} = \frac{(T_1 s + 1)^2}{k_1 (T_F s + 1)^2 - k_1 e^{-\tau s}} \quad (3-38)$$

Po dosazení parametrů odpovídající identifikovanému přenosu (2-6) a $T_F = 20s$:

$$R(s) = \frac{(27.6s + 1)^2}{0.985(20s + 1)^2 - 0.985e^{-20s}} \quad (3-39)$$



Obrázek 3.7 - Regulace modelu bez směšovače
(s vnitřním modelem)

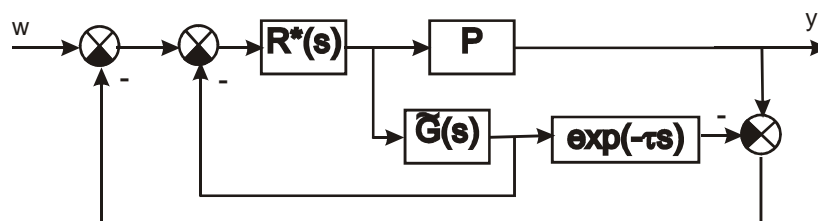


Obrázek 3.8 - Regulace modelu se směšovačem
(s vnitřním modelem)

Při regulaci se směšovačem musíme nastavit T_F experimentálně (pro tento případ $T_F = T_I = 27.6\text{s}$), jinak nereguluje na žádanou hodnotu, důvodem je již zmíněná malá robustnost na odchylky mezi modelem a soustavou, na který je regulátor nastaven.

3.4 Smithův prediktivní regulátor

Jedná se o vylepšení standardních PID regulátorů, jenž pro systémy s dopravním zpožděním navrhl v roce 1957 O. J. Smith, podle Večerek, Schlegel [4]. Ve své struktuře, konkrétně v kladné zpětné vazbě, obsahuje matematický model regulované soustavy, pro kompenzaci dopravního zpoždění. Struktura Smithova regulátoru je na *Obrázku 16*. Regulační člen $R^*(s)$ pak lze navrhnout jako regulátor pro soustavu bez dopravního zpoždění, např. metodou inverze dynamiky. Smithův regulátor se v praxi používá pro svou jednoduchou strukturu, ale má poměrně mnoho nastavovaných parametrů, což není žádoucí zvláště při experimentálním nastavování, které je nutné mnohdy provést. U Smithova regulátoru je experimentální nastavení téměř nemožné, bez předchozí identifikace soustavy.



Obrázek 3.9 - Schéma Smithova regulátoru

$\tilde{G}(s)$ je přenos modelu řízené soustavy bez dopravního zpoždění.

- 1) Regulovaná soustava 1. řádu se zpožděním $G(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-\tau}$:

Přenos modelu soustavy bez dopravního zpoždění

$$\tilde{G}(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1} \quad (3-40)$$

Parametry PI regulátoru navrženého metodou inverze dynamiky, podle [1] $k_p = T_I / (k_1 T_w)$, $T_I = T_I$, kde T_w je stavitelná časová konstanta.

Po dosazení parametrů odpovídající identifikovanému přenosu (2-5) a $T_w = 20s$ dostaneme přenos:

$$R^*(s) = 2.36 \left(1 + \frac{1}{46.2s} \right) \quad (3-41)$$

- 2) Regulovaná soustava 2. řádu se zpožděním $G(s) = \frac{k_1}{(T_1 s + 1)^2} e^{-\tau}$:

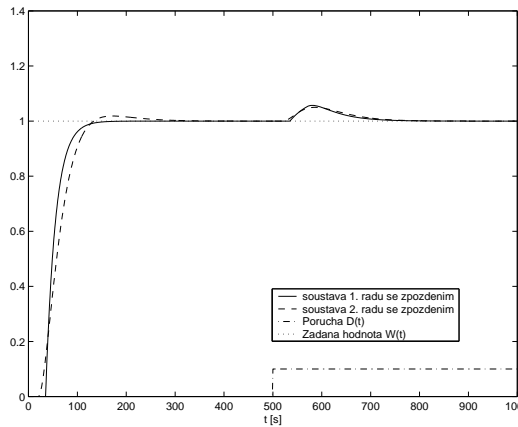
Přenos modelu soustavy bez dopravního zpoždění

$$\tilde{G}(s) = \frac{k_1}{(T_1 s + 1)^2} \quad (3-42)$$

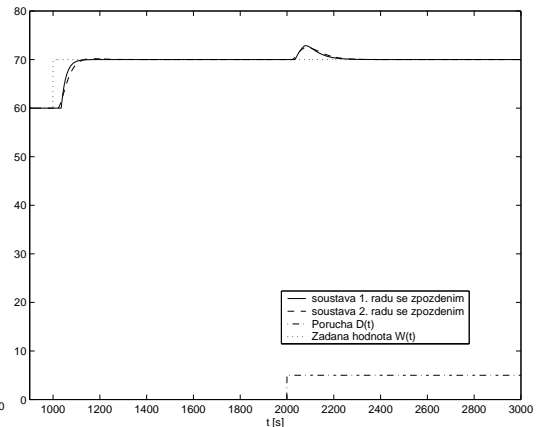
Parametry PID regulátoru navrženého metodou inverze dynamiky, podle [1] $k_p = T_I / (k_1 T_w)$, $T_I = 2T_I$, $T_D = T_I/2$, kde T_w je stavitelná časová konstanta.

Po dosazení parametrů odpovídající identifikovanému přenosu (2-6) a $T_w = 40s$ dostaneme přenos:

$$R^*(s) = 1.40 \left(1 + \frac{1}{55.2s} + 13.8s \right) \quad (3-43)$$



Obrázek 3.10 - Regule modelu bez směšovače (Smithův prediktor)



Obrázek 3.11 - Regule modelu se směšovačem (Smithův prediktor)

3.5 Modifikace Smithova regulátoru

Modifikovaný Smithův regulátor pro soustavy s dopravním zpožděním, již ve struktuře neobsahuje přímo matematický model regulované soustavy. Z tohoto důvodu může být konstruován jako univerzální. Pro jeho návrh, podle Vítěčková [3], použijeme metodu inverze dynamiky. Uvažujeme přenos regulované soustavy s dopravním zpožděním

$$G(s) = \tilde{G}(s)e^{-\tau s} \quad (3-44)$$

Přenos uzavřené regulační smyčky je

$$G_w(s) = \frac{R^*(s)\tilde{G}(s)e^{-\tau s}}{1 + R^*(s)\tilde{G}(s)e^{-\tau s}} \quad (3-45)$$

cílem je navrhnout takový modifikovaný Smithův regulátor, aby ze jmenovatele přenosu řízení odstranil exponenciální funkci dopravního zpoždění

$$G_w(s) = \frac{R(s)\tilde{G}(s)}{1 + R(s)\tilde{G}(s)} e^{-\tau s} \quad (3-46)$$

dostaneme tak přenos modifikovaného Smithova regulátoru

$$R(s) = \frac{1}{\tilde{G}(s)e^{-\tau s}} \cdot \frac{G_w(s)}{1 - G_w(s)} \quad (3-47)$$

Označíme-li žádaný přenos otevřeného regulačního obvodu bez dopravního zpoždění

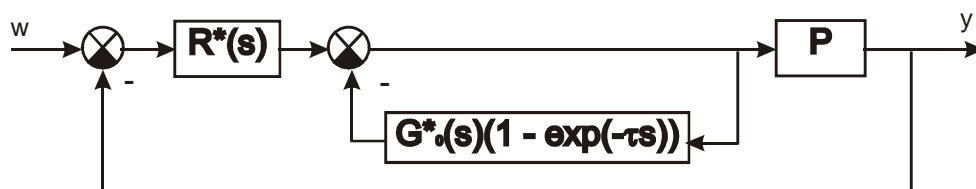
$$G_0^*(s) = R^*(s)\tilde{G}(s) \quad (3-48)$$

pak platí

$$G_w(s) = \frac{G_0^*(s)}{1 + G_0^*(s)} e^{-\tau_s} \quad (3-49)$$

Po dosazení (3-49) do (3-47) dostaneme přenos modifikovaného Smithova regulátoru

$$R(s) = \frac{R^*(s)}{1 + G_0^*(s)(1 - e^{-\tau_s})} \quad (3-50)$$



Obrázek 3.12 - Modifikovaný Smithův regulátor

Požadovaný přenos řízení volíme

$$G_w(s) = \frac{1}{T_w s + 1} e^{-\tau_s} \quad (3-51)$$

a jemu odpovídá přenos otevřené smyčky regulačního obvodu ve tvaru

$$G_0^*(s) = 1/(T_w s) \quad (3-52)$$

Návrh parametrů regulačního přenosu $R^*(s) = k_p (1 + 1/(T_I s) + T_D s)$ provedeme pro systém bez dopravního zpoždění, např. metodou inverze dynamiky, obdobně jako pro původní Smithův regulátor, viz výše. Tato modifikace Smithova regulátoru obsahuje méně stavitelných parametrů, proto je vhodnější pro použití v praxi, kde se často parametry nastavují experimentálně.

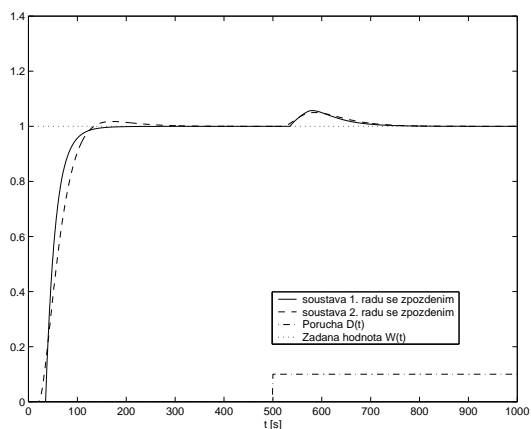
Výsledný přenos $R^*(s)$ pak je:

- 1) Pro identifikovaný přenos (2-5), 1. řádu se zpožděním, a $T_w = 20s$:

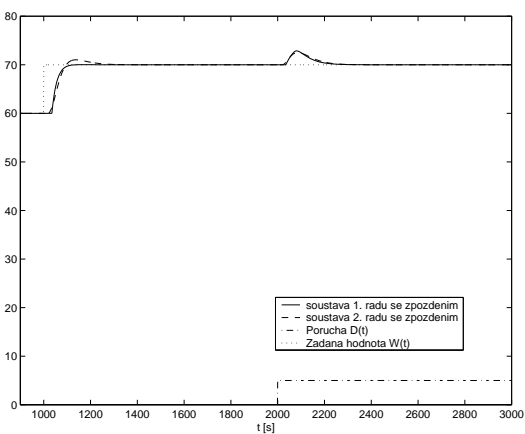
$$R^*(s) = 2.36 \left(1 + \frac{1}{46.2s} \right) \quad (3-53)$$

2) Pro identifikovaný přenos (2-6), 2. řádu se zpožděním, a $T_w = 40s$:

$$R^*(s) = 1.40 \left(1 + \frac{1}{55.2s} + 13.8s \right) \quad (3-54)$$



Obrázek 3.13 - Regulace modelu bez směšovače (modifikovaný Smithův prediktor)



Obrázek 3.14 - Regulace modelu se směšovačem (modifikovaný Smithův prediktor)

4 Srovnání jednotlivých metod návrhu regulátorů

Ted' porovnáme jednotlivé metody návrhu regulátoru a vliv změn parametrů regulované soustavy na regulační pochod.

Simulace provádíme na identifikovaných přenosech 1. a 2. řádu se zpožděním a modelu směšování, kde $T_{IZdr} = 55^\circ \text{C}$, $T_{OZdr} = 90^\circ \text{C}$, $m = 197 \text{ m}^3/\text{h}$.

Pro následující průběhy v této kapitole předpokládáme:

- 1) Průběhy výstupní regulované veličiny z identifikovaných modelů 1. řádu (2-5), resp. 2. řádu (2-6) se zpožděním *bez směšování*
 - a. Žádaná hodnota regulované veličiny $W(t)$ je skoková funkce z 0 na 1 v čase 0 s
 - b. Porucha $D(t)$ je skoková funkce z 0 na 0.1 v čase 500 s
- 2) Průběhy výstupní regulované veličiny z identifikovaných modelů 1. řádu (2-5), resp. 2. řádu (2-6) se zpožděním a *směšováním*
 - a. Žádaná hodnota regulované veličiny $W(t)$ je skoková funkce z 60 na 70 v čase 2000 s
 - b. Porucha $D(t)$ je skoková funkce z 0 na 5 v čase 3000 s

Porucha $D(t)$ zastupuje vliv změny odběru tepla z výměníku, kdy se mění teplota T_{IZdr} . Teplotu ze zdroje tepla T_{OZdr} uvažujeme za konstantní (tvrdý zdroj tepla), průtok vody předpokládáme také konstantní (vliv na velikost dopravního zpoždění).

Parametry nastavení jednotlivých regulátorů jsou uvedeny v *Tabulce 4.1* (Kapitola 4.6).

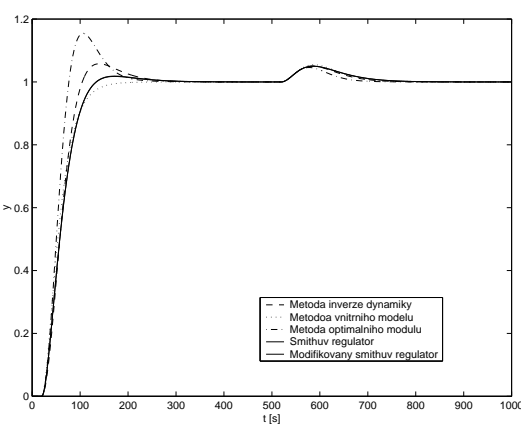
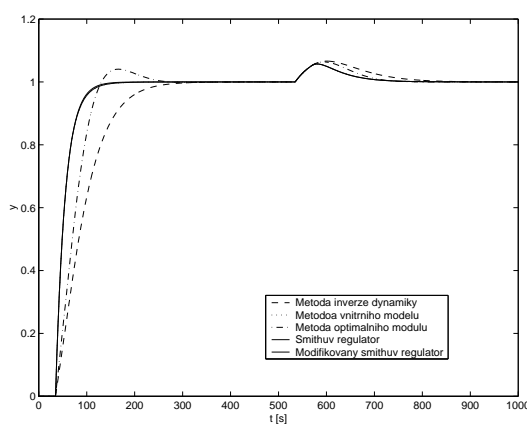
Simulační programy a schéma naleznete na přiloženém CD v adresáři `\Simulace regulátorů v Matlabu 5.3\` a `\Simulace regulátoru v Matlabu 5.3 pro různé směšovací char\`.

4.1 Model odpovídá regulované soustavě

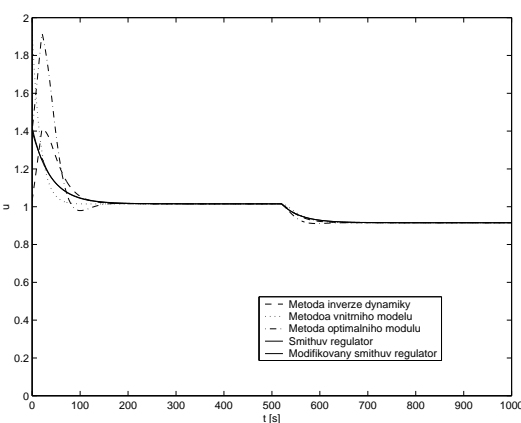
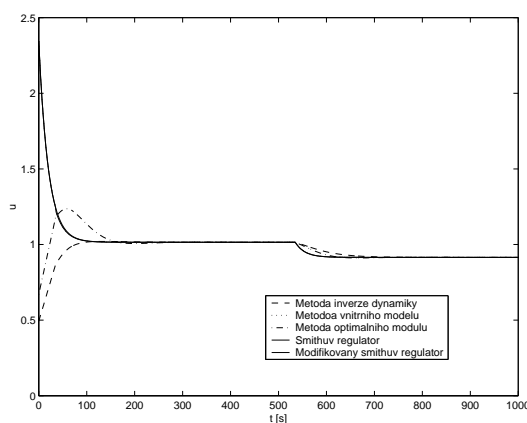
Nejdříve porovnáme výsledky návrhu regulátoru jednotlivými metodami pro regulovanou soustavu, která přesně odpovídá identifikované, i když při řízení reálné soustavy těchto výsledků většinou nedosáhneme.

Nejlépeších výsledků při regulaci soustavy 1. řádu se zpožděním, jak vidíme na *Obrázku 4.1*, dosahuje Smithův, modifikovaný Smithův regulátor a regulátor s vnitřním modelem. Mají téměř shodné průběhy regulované veličiny.

Regulovaná veličina $y(t)$:



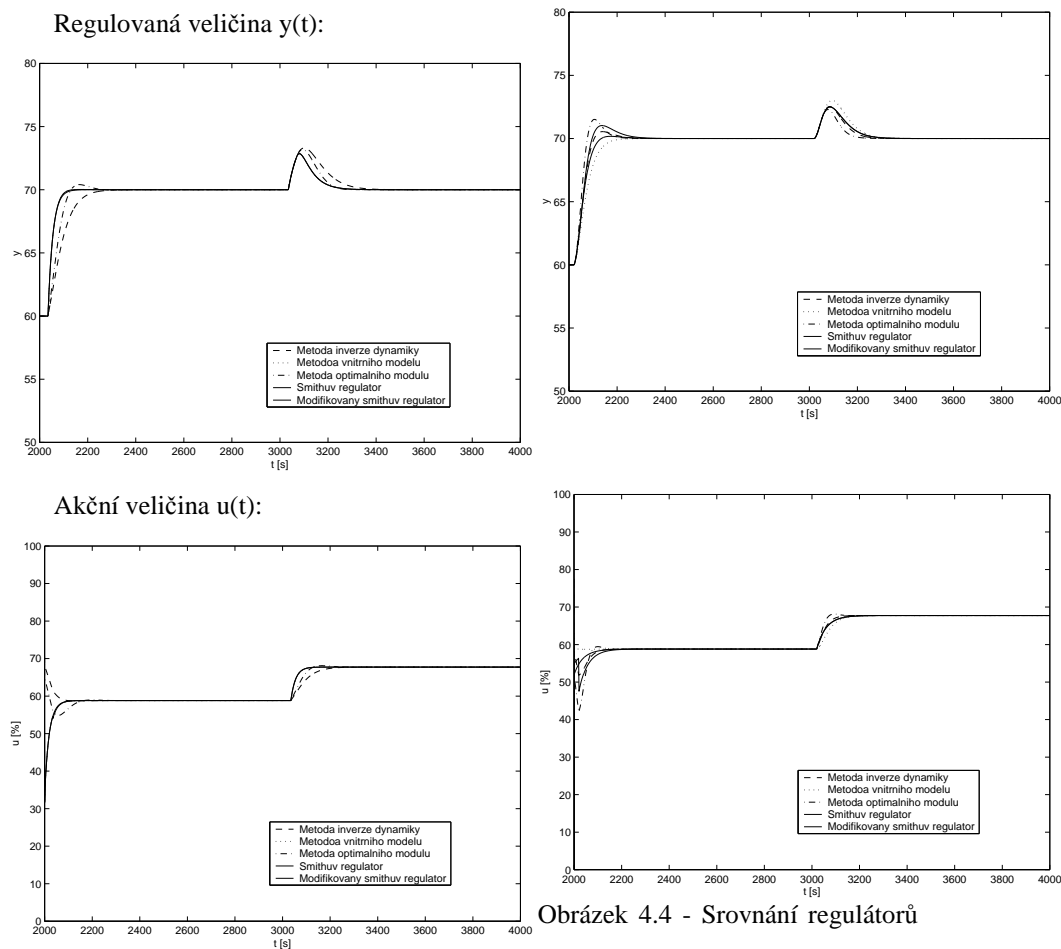
Akční veličina $u(t)$:



Obrázek 4.1 - Srovnání regulátorů na soustavě 1. řádu s dopravním zpožděním bez směřování (parametry reg. viz *Tabulka 4.1 – 1*)

Obrázek 4.2 - Srovnání regulátorů na soustavě 2. řádu s dopravním zpožděním bez směřování (parametry reg. viz *Tabulka 4.1 – 2*)

Regulátor navržený metodou optimálního modulu vykazuje největší překmit a regulátor metodou inverze dynamiky má nejpomalejší odezvu. U soustavy 2. řádu se zpožděním mají všechny metody poměrně rychlý náběh regulované veličiny na žádanou hodnotu, jen regulátory navržené metodami inverze dynamiky a optimálního modulu mají větší překmit žádané hodnoty.



Obrázek 4.3 - Srovnání regulátorů na soustavě 1. řádu s dopravním zpožděním se směřováním (parametry reg. viz Tabulka 4.1 – 1)

Obrázek 4.4 - Srovnání regulátorů na soustavě 2. řádu s dopravním zpožděním se směšováním (parametry reg. viz Tabulka 4.1 – 2)

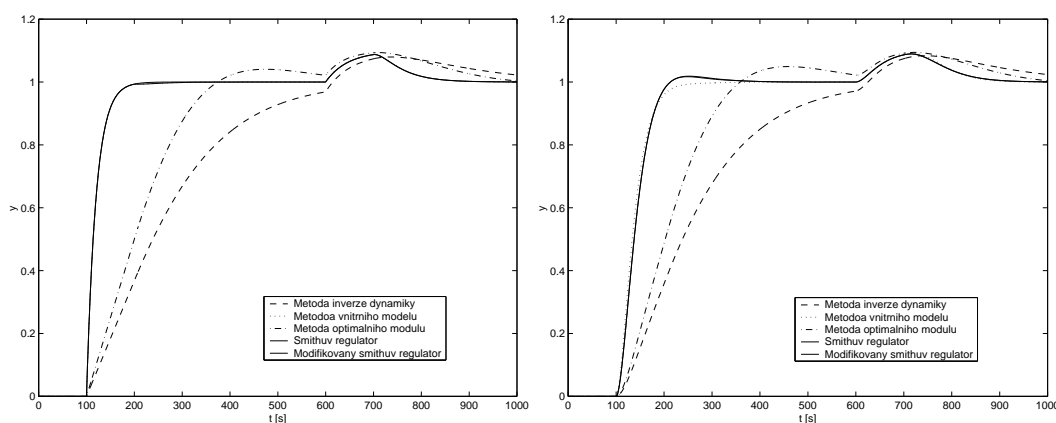
Při regulaci soustav s dopravním zpožděním s modelem směšovače (což vlastně znamená omezení teplot akční veličiny v rozsahu $\langle T_{IZdr}; T_{OZdr} \rangle$), simulační schéma soustavy se směšovačem je na Obrázku 2.3), se dosahuje

podobných výsledků jako při simulaci bez směřování. Simulované průběhy jsou na *Obrázcích 4.3 a 4.4*. Jen u modifikovaného Smithova reg. na soustavě 2. řádu vzniká překmit, regulátor má poměrně vysoké zesílení - zvýšit T_w .

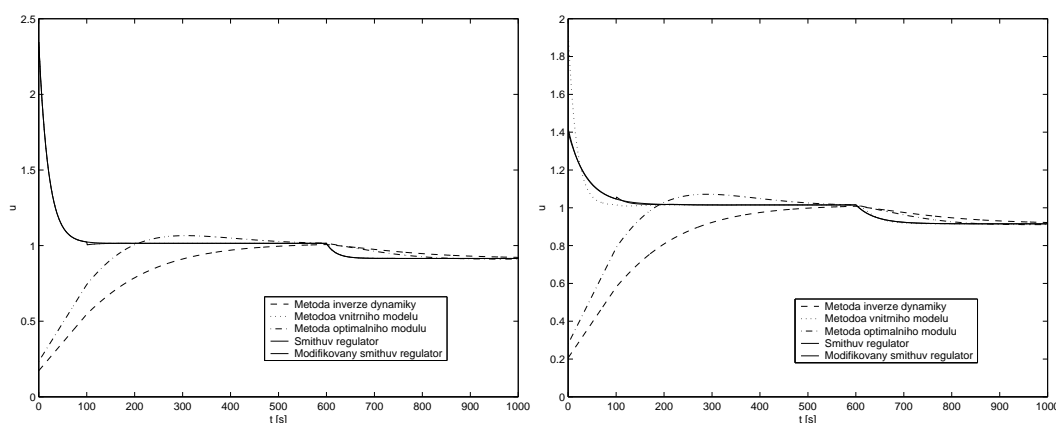
4.2 Regulace při větším dopravním zpoždění

Při měření byl průtok poměrně vysoký (jak již bylo napsáno výše, $m = 197 \text{ m}^3/\text{h}$) a dopravní zpoždění tudíž je poměrně malé (τ může dosahovat až 4 min.). Použité regulační metody si s touto soustavou ještě poradí.

Regulovaná veličina $y(t)$:



Akční veličina $u(t)$:



Obrázek 4.5 - Srovnání regulátorů na soustavě 1. řádu s dopravním zpožděním $\tau = 100\text{s}$ bez směšování (Reg. přepočítané na $\tau = 100\text{s}$) (parametry reg. viz *Tabulka 4.1 – 3*)

Obrázek 4.6 - Srovnání regulátorů na soustavě 2. řádu s dopravním zpožděním $\tau = 100\text{s}$ bez směšování (Reg. přepočítané na $\tau = 100\text{s}$) (parametry reg. viz *Tabulka 4.1 – 4*)

Problémy nastávají, když dopravní zpoždění τ ku době náběhu je větší než 0.5, kdy se soustava stává špatně regulovatelná (podle [4]). Zde se projevují přednosti Smithových prediktorů, které vliv tohoto velkého dopravního zpoždění potlačí.

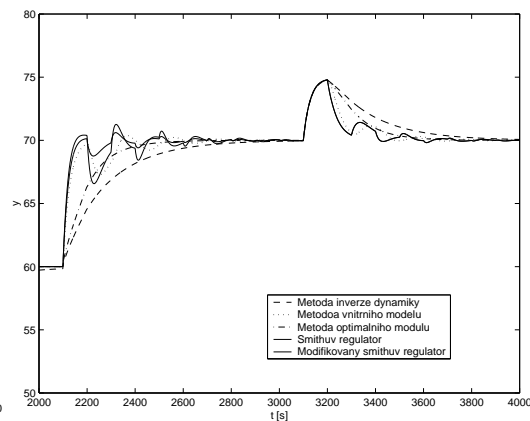
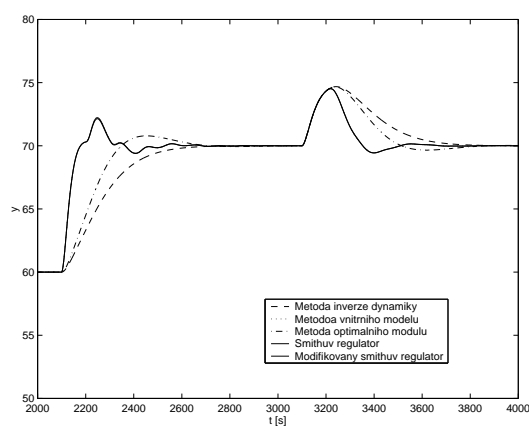
Pro simulace jsme měli dopravní zpoždění $\tau = 100\text{s}$ a dokázali jsme tak, přednosti Smithova prediktoru, na *Obrázku 4.5* a *4.6*. Parametry regulátorů na tuto hodnotu dopravního zpoždění jsme znovu přepočítali, viz *Tabulka 4.1* – označení 3, 4 (*kapitola 4.6*).

Je zde vidět, jak regulátory metodou optimálního modulu a inverze dynamiky prodlužují dobu ustálení regulované veličiny s rostoucím dopravním zpožděním. Na Smithovy prediktory (Smithův a modifikovaný Smithův prediktor) či regulátor s vnitřním modelem, tato změna ovšem nemá vliv. Regulátor s vnitřním modelem se chová podobně jako Smithovy regulátory.

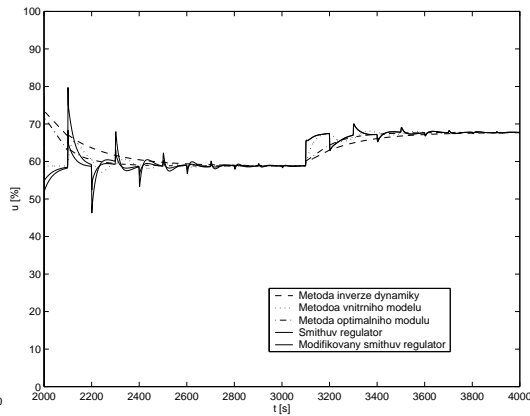
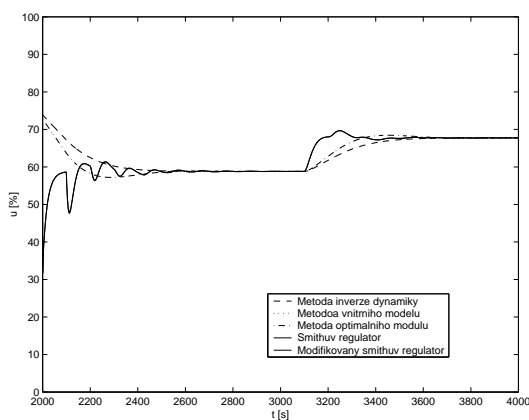
4.3 Model neodpovídá regulované soustavě

Při zachování stávajícího nastavení parametrů regulátorů pro $\tau = 100$ s (parametry reg. viz *Tabulka 4.1 – 3, 4*), předpokládáme odchylky regulované soustavy od modelu, dle popisu jednotlivých *Obrázků 4.7 až 4.16*.

Regulovaná veličina $y(t)$:



Akční veličina $u(t)$:



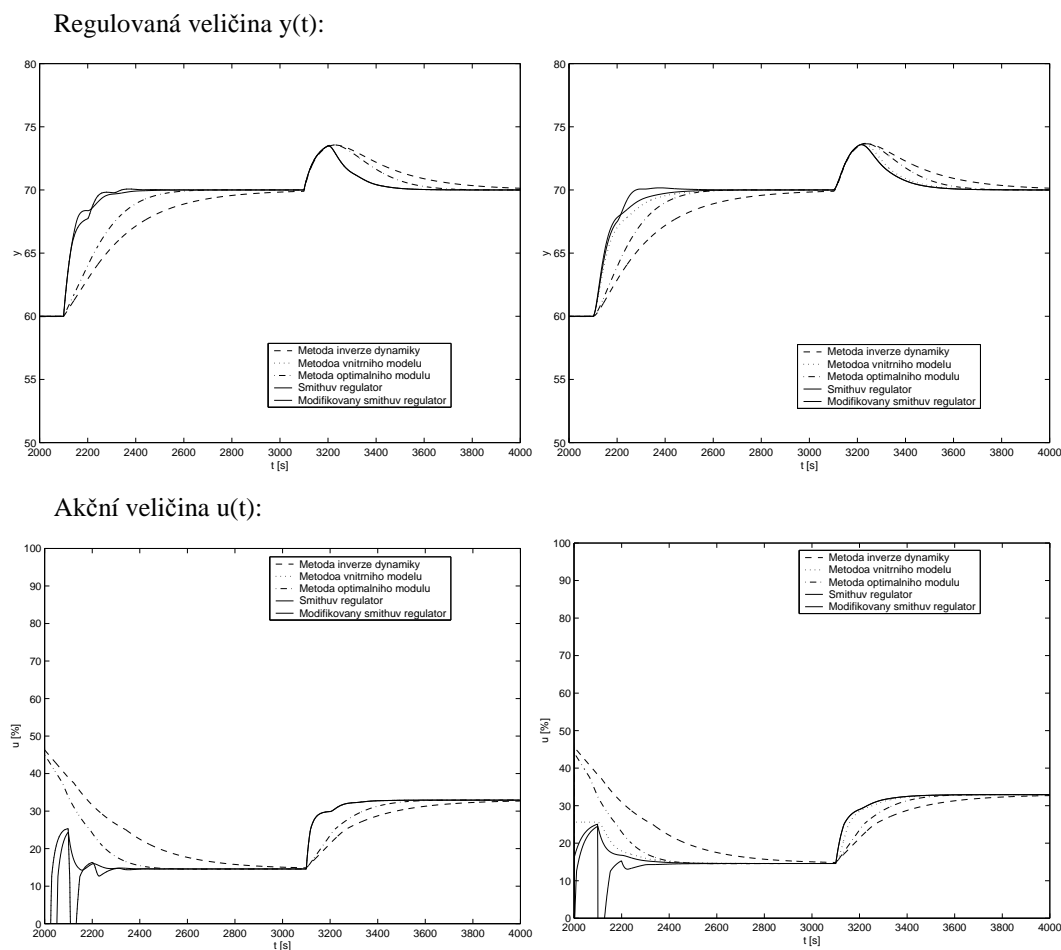
Obrázek 4.7 - Srovnání regulátorů navržených na soustavu 1. řádu s dopravním zpožděním se směřováním ($\tau = 100$ s, reg. soustava je 2. řádu se zpožděním) (parametry reg. viz *Tabulka 4.1 – 3*)

Obrázek 4.8 - Srovnání regulátorů navržených na soustavu 2. řádu s dopravním zpožděním se směšováním ($\tau = 100$ s, reg. soustava je 1. řádu se zpožděním) (parametry reg. viz *Tabulka 4.1 – 4*)

Nejprve mějme regulovanou soustavu jiného řádu než na, který je regulátor navržen, dále simulujeme změnu zesílení regulované soustavy k_I o -20% a

odchylku časové konstanty T_I o +20% a nakonec dopravního zpoždění o +/- 20%. A sledujeme jak se tyto změny regulované soustavy projeví při regulaci.

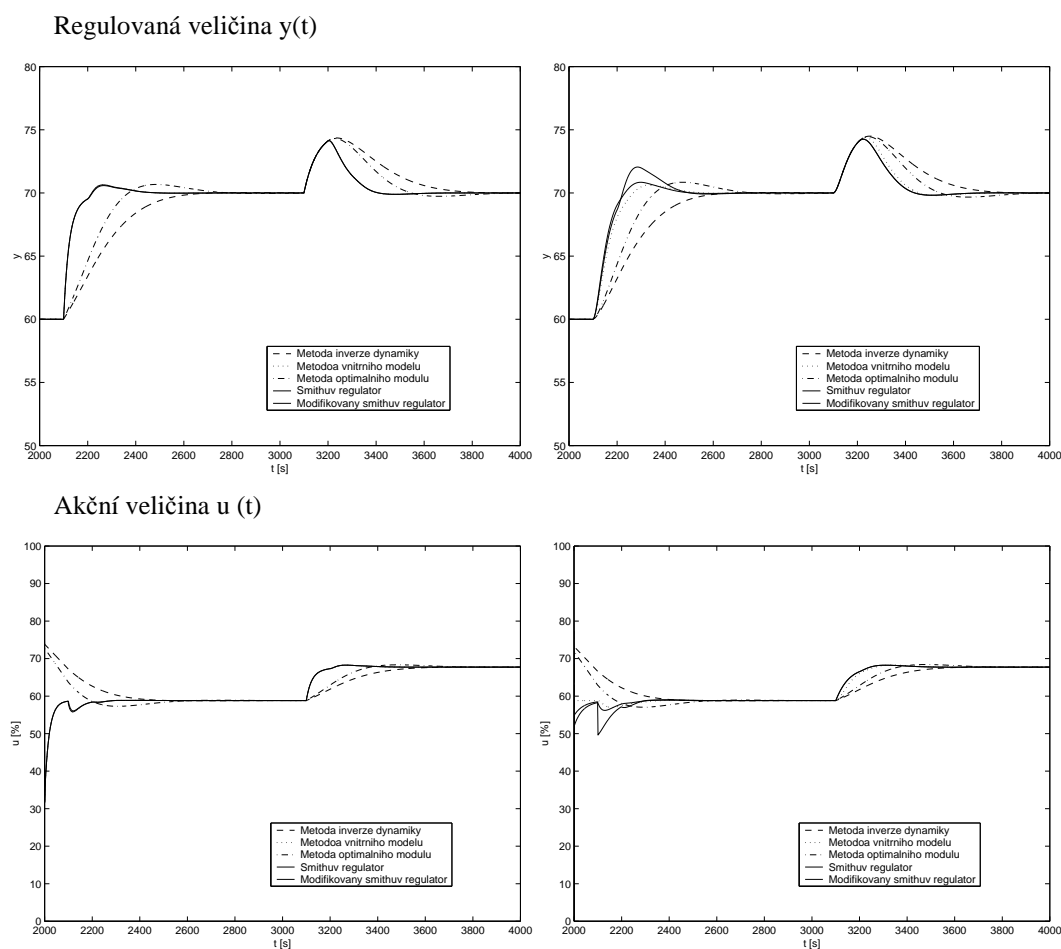
Při regulaci soustavy jiného řádu než na který je regulátor navržen, jsou na akční veličině u regulátorů obecných struktur (Smithův, modifikovaný Smithův a s vnitřním modelem) nežádoucí špičky (Obrázky 4.7, 4.8) způsobující kmitavý průběh regulované veličiny. Regulátor navržený na 1. řád regulované soustavy si lépe poradí se soustavou 2. řádu, než regulátor navržený na 2. řád se soustavou 1. řádu.



Obrázek 4.9 - Srovnání regulátorů navržených na soustavu 1. řádu s dopravním zpožděním se směřováním ($\tau=100s$, zesílení reg. soustavy je $k_I - 20\%$) (parametry reg. viz Tabulka 4.1 – 3)

Obrázek 4.10 - Srovnání regulátorů navržených na soustavu 2. řádu s dopravním zpožděním se směřováním ($\tau=100s$, zesílení reg. soustavy je $k_I - 20\%$) (parametry reg. viz Tabulka 4.1 – 4)

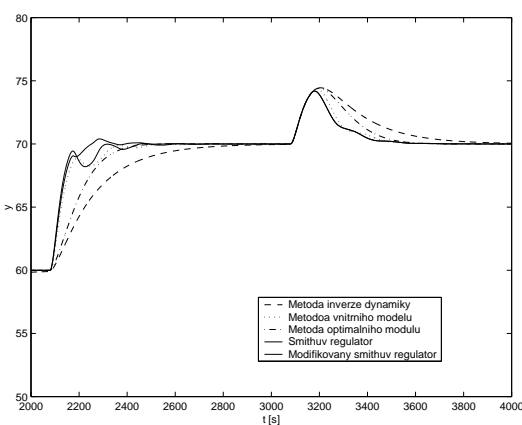
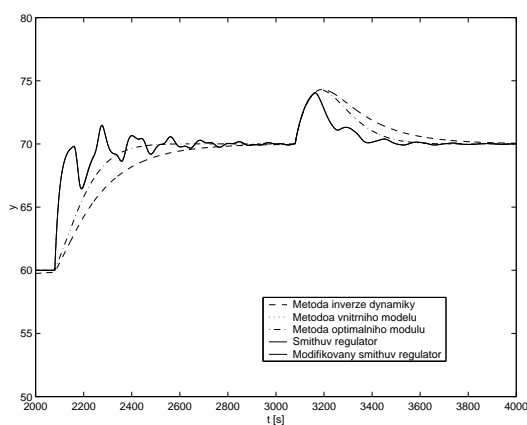
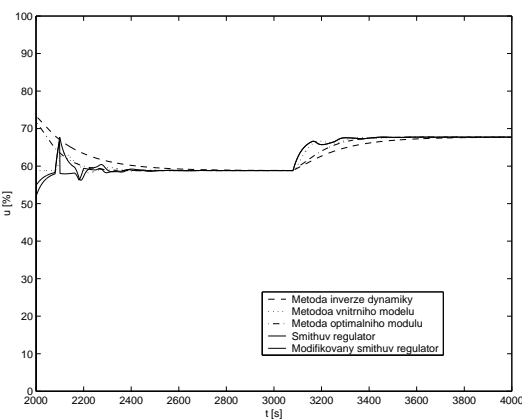
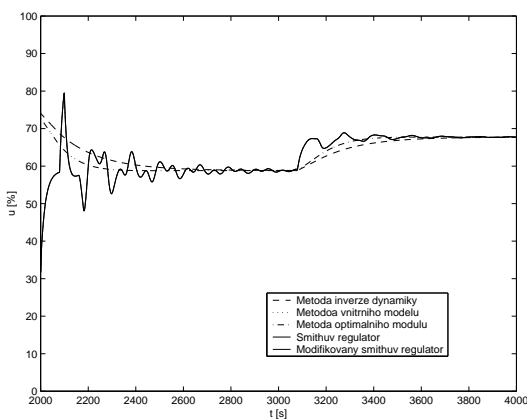
Při změně zesílení soustavy (Obrázek 4.9, 4.10) se posouvá pracovní bod směšovacího ventilu do nelineární části, pak regulátor je z jedné strany více omezen velikostí možných akčních zásahů a objevují se kmity na regulované veličině, zejména u Modifikovaného Smithova prediktivních regulátorů. Může nastat problém při linearizaci směšovací charakteristiky. Tento stav může přijít např. při změnách či poničení izolace na potrubí.



Obrázek 4.11 - Srovnání regulátorů navržených na soustavu 1. řádu s dopravním zpožděním se směšováním ($\tau = 100$ s, časová konst. reg. soustavy je $T_1 + 20\%$) (parametry reg. viz Tabulka 4.1 – 3)

Obrázek 4.12 - Srovnání regulátorů navržených na soustavu 2. řádu s dopravním zpožděním se směšováním ($\tau = 100$ s, časová konst. reg. soustavy je $T_1 + 20\%$) (parametry reg. viz Tabulka 4.1 – 4)

Změna časové konstanty soustavy (Obrázek 4.11, 4.12) má za následek překmit na regulované veličině, zvláště při regulaci regulátory obsahující model regulované soustavy ve své struktuře. Tato změna nemá zásadní vliv na průběh regulace, pokud, jako v případě naší regulované soustavy, menší překmit nevadí. Kdyby ovšem změna časové konstanty byla velká, je lepší provést novou identifikaci modelu soustavy a nové nastavení parametrů regulátoru.

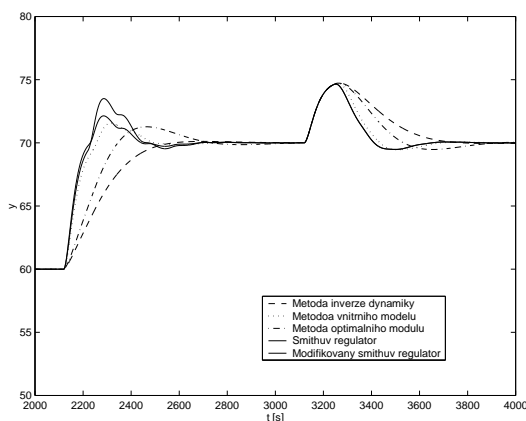
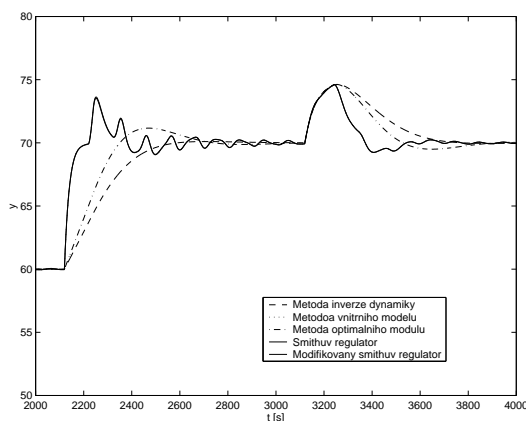
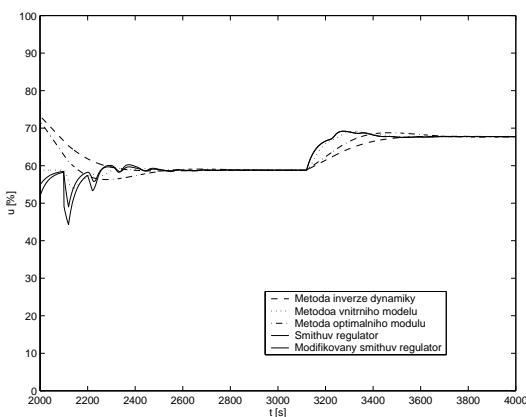
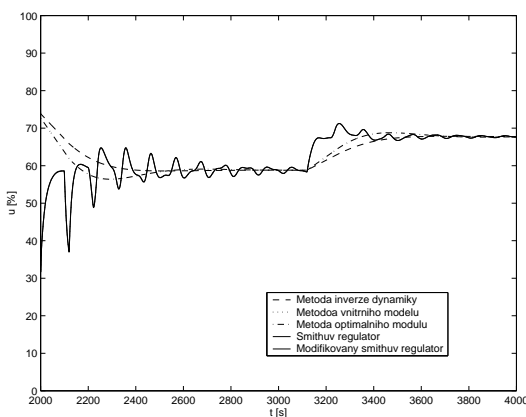
Regulovaná veličina $y(t)$:Akční veličina $u(t)$:

Obrázek 4.13 - Srovnání regulátorů navržených na soustavu 1. řádu s dopravním zpožděním se směřováním ($\tau = 100$ s, dopr. zpoždění reg. soustavy je $\tau - 20\%$) (parametry reg. viz Tabulka 4.1 – 3)

Obrázek 4.14 - Srovnání regulátorů navržených na soustavu 2. řádu s dopravním zpožděním se směřováním ($\tau = 100$ s, dopr. zpoždění reg. soustavy je $\tau - 20\%$) (parametry reg. viz Tabulka 4.1 – 4)

Nepatrné změny dynamiky pravděpodobně nastanou i při změnách průtoku potrubím, ale nebudou tak výrazné jako při simulaci. Změna průtoku má ale významný vliv na změnu dopravního zpoždění.

Regulace při odlišném dopravním zpoždění (Obrázky 4.13 až 4.16) než na který je regulátor navržen je problematické. U regulátorů s modelem regulované soustavy, vznikají kmity na regulované veličině, jelikož nedochází k úplné kompenzaci dopravního zpoždění. Regulátory, se pak chovají podobně, jako PID nastavené na soustavu bez dopravního zpoždění.

Regulovaná veličina $y(t)$:Akční veličina $u(t)$:

Obrázek 4.15 - Srovnání regulátorů navržených na soustavu 1. řádu s dopravním zpožděním se směřováním ($\tau = 100$ s, dopr. zpoždění reg. soustavy je $\tau + 20\%$) (parametry reg. viz Tabulka 4.1 – 3)

Obrázek 4.16 - Srovnání regulátorů navržených na soustavu 2. řádu s dopravním zpožděním se směřováním ($\tau = 100$ s, dopr. zpoždění reg. soustavy je $\tau + 20\%$) (parametry reg. viz Tabulka 4.1 – 4)

Jelikož u zadané soustavy lze poměrně přesně vypočítat dopravní zpoždění v každém okamžiku z měřeného objemového průtoku, je vhodné toto zpoždění přepočítávat a měnit v průběhu regulace.

Nejlepší robustnosti na změnu parametrů modelu vykazují klasické regulátory PID (optimální modul a inverze dynamiky), mají ale pomalý regulační pochod, zvláště při velkém dopravním zpoždění. Při regulaci na žádanou hodnotu modifikovaný Smithův regulátor vykazuje odchylky, u soustavy 2. řádu, od průběhu Smithova regulátoru, způsobené omezením akčních zásahů. Ovšem při experimentálním doladění časových konstant T_w , Smithova a modifikovaného Smithova prediktivního regulátoru, resp. časové konstanty T_F regulátoru s vnitřním modelem, lze dosáhnout hladších regulačních pochodů i u těchto regulátorů, a rychlejších odezev než u PID.

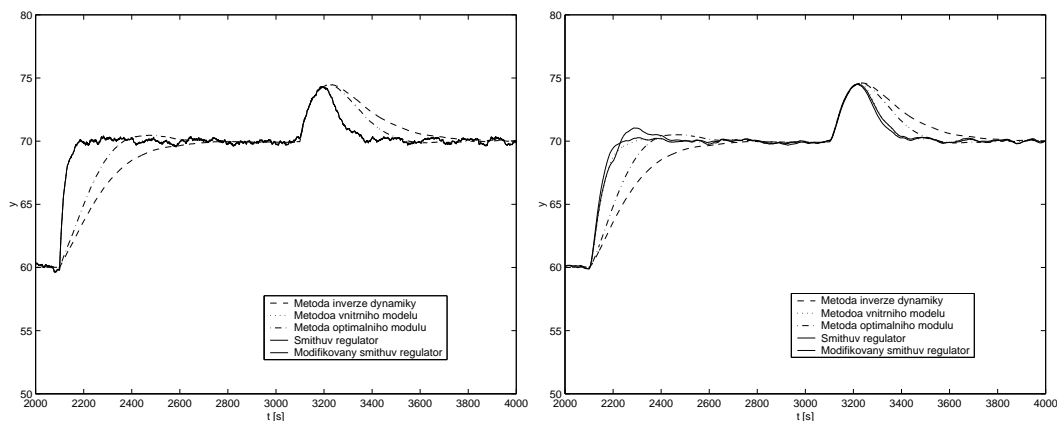
Při vyregulování poruchy si vedli nejlépe regulátory Smithův, modifikovaný Smithův a s vnitřním modelem. Opět mají téměř totožné průběhy.

4.4 Regulace se šumem na regulované veličině

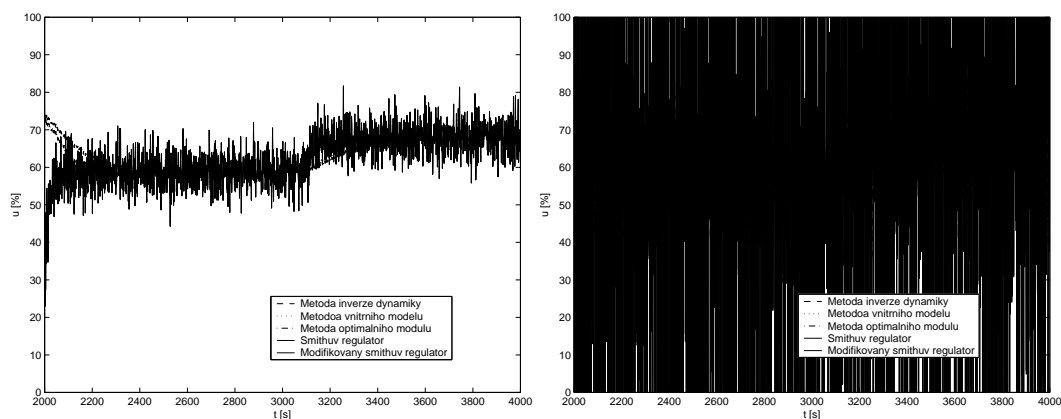
Na *Obrázcích 4.17 a 4.18* je simulovaný průběh regulované veličiny, při působení bílého šumu na vstupu do regulátoru.

Šum má za důsledek rozkmitání akční veličiny – a tím kuželky ventilu. U soustavy 2. řádu se zpožděním jsou tyto kmity poměrně velké – způsobené pomalejší odezvou soustavy než u 1. řádu. Vliv bílého šumu na Smithovy a regulátor s vnitřním modelem se dá opět snížit zvýšením stavitelných časových konstant, za cenu pomalejšího náběhu. Náběh na žádanou hodnotu při tomto zvýšení, pro velké dopravní zpoždění (od 100s), je stále rychlejší než u PID. Pro nižší dopravní zpoždění jsou regulační pochody testovaných regulátorů srovnatelné. Při změně parametrů regulované soustavy, je regulační pochod srovnatelný s průběhy simulovanými na soustavě bez šumu. Pokud šum je příliš velký je lepší před samotný regulátor předradit dolnoproustní filtr, který tento šum potlačí. Omezíme tak nechtěné kmitání kuželky regulačního členu (třicestného ventilu).

Regulovaná veličina $y(t)$:



Akční veličina $u(t)$:



Obrázek 4.17 - Srovnání regulátorů

navržených na soustavu 1. řádu s dopravním zpožděním se směšováním ($\tau = 100$ s, bílý šum na reg. veličině $\pm 1^\circ \text{C}$) (parametry reg. viz Tabulka 4.1 – 3)

Obrázek 4.18 - Srovnání regulátorů

navržených na soustavu 2. řádu s dopravním zpožděním se směšováním ($\tau = 100$ s, bílý šum na reg. veličině $\pm 1^\circ \text{C}$) (parametry reg. viz Tabulka 4.1 – 4)

Předchozí simulace byly ukázány na soustavě se směšováním, průběhy na samotné soustavě bez směšování mají totožný charakter, téměř se neliší.

4.5 Odchylka modelu směšování

Pro další úvahy budeme mít již jen model regulované soustavy 1. řádu, jelikož pro většinu aplikací přenosu tepla (i v našem případě) je tato aproximace postačující. Je to zřejmé i ze simulací výše např. z podobnosti průběhů či z Obrázku 4.7, kde si regulátor navržený na soustavu 1. řádu poradí se soustavou 2.

řádu (po experimentálním vyladění časových konstant se dosáhne ještě lepších výsledků).

Při regulaci směřováním, jako v našem případě, je také velmi důležitá znalost průběhu směšovací charakteristiky (Obrázek 2.4). Její tvar má zásadní vliv na regulační pochod. Liší-li se reálná charakteristika ventilu od předpokládané, kterou obsahuje navržený regulátor, zhorší se stabilita regulované soustavy a ventil může zůstat vyset v jedné z krajních poloh otevření. To způsobuje překmity regulované veličiny.

Pro simulaci volíme aproximace inverzní směšovací charakteristiky na výstupu z regulátoru (v rovnicích je zahrnut převod výstupu regulátoru z rozsahu $\langle T_{IZdr}; T_{OZdr} \rangle$ na rozsah 0-100% otevření ventilu):

1) funkcí arcsinus()

$$u = \arcsin \left(\left(2 \left(\frac{1}{T_{IZdr} - T_{OZdr}} u_{Výst\ Re\ g} - \frac{T_{OZdr}}{T_{IZdr} - T_{OZdr}} \right) - 1 \right) / \pi + 0.5 \right) \quad (4-1)$$

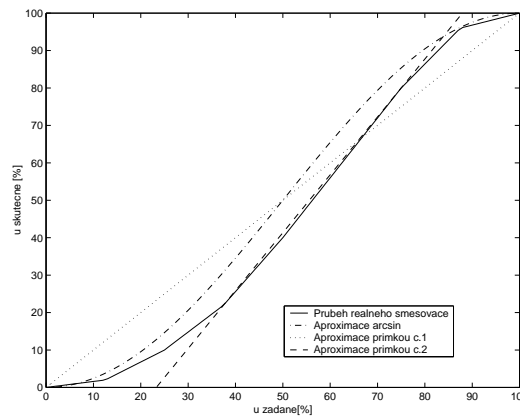
2) přímkou č. 1

$$u = \frac{1}{T_{IZdr} - T_{OZdr}} u_{Výst\ Re\ g} - \frac{T_{OZdr}}{T_{IZdr} - T_{OZdr}} \quad (4-2)$$

3) přímkou č. 2

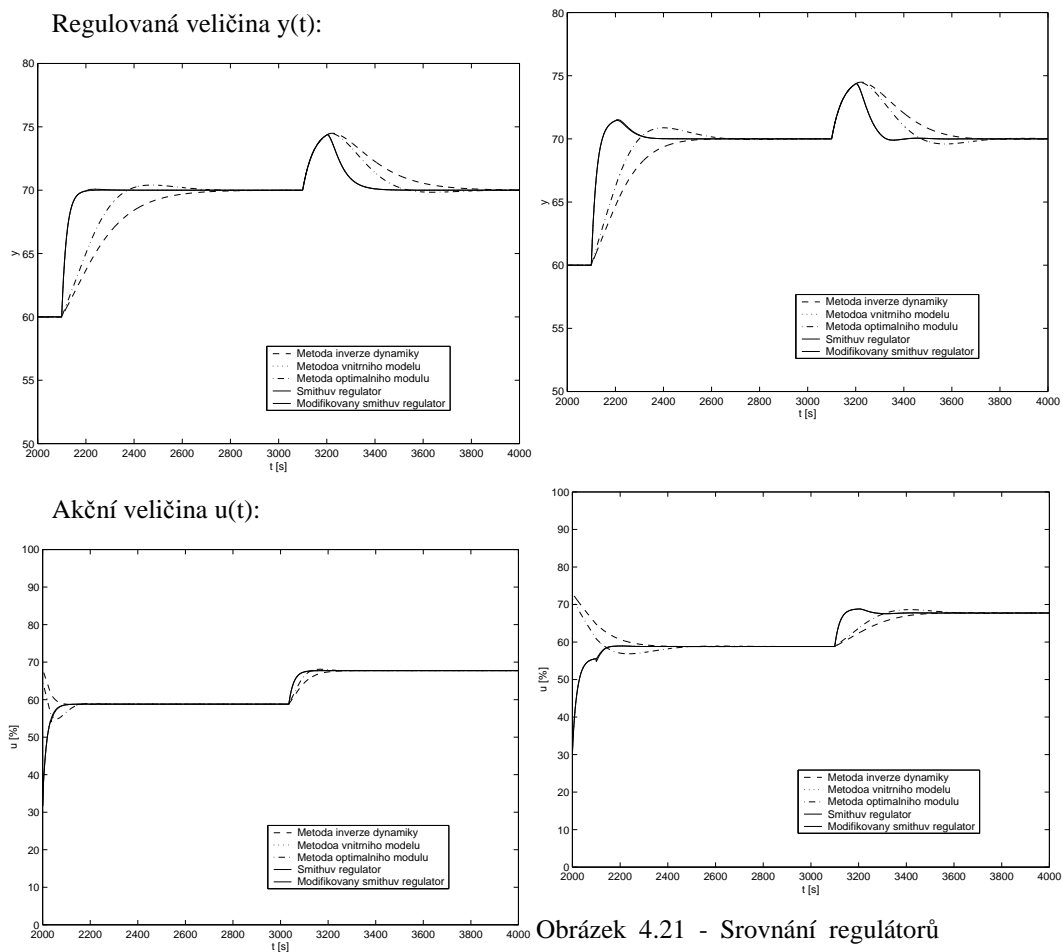
$$u = \frac{0.6464}{T_{IZdr} - T_{OZdr}} u_{Výst\ Re\ g} - \frac{0.6464 T_{OZdr}}{T_{IZdr} - T_{OZdr}} + 0.2328 \quad (4-3)$$

Jednotlivé aproximace směšovací charakteristiky ventilu jsou vykreslené na Obrázku 4.19.



Obrázek 4.19 – Směšovací charakteristiky

Průběh, který dosáhneme aproximací funkcí $\arcsin()$ podle rovnice (4-1), se ve střední části odchyluje od skutečné směšovací charakteristiky, což může mít za následek překymity na regulované veličině. Simulované průběhy jsou na Obrázku 4.21.



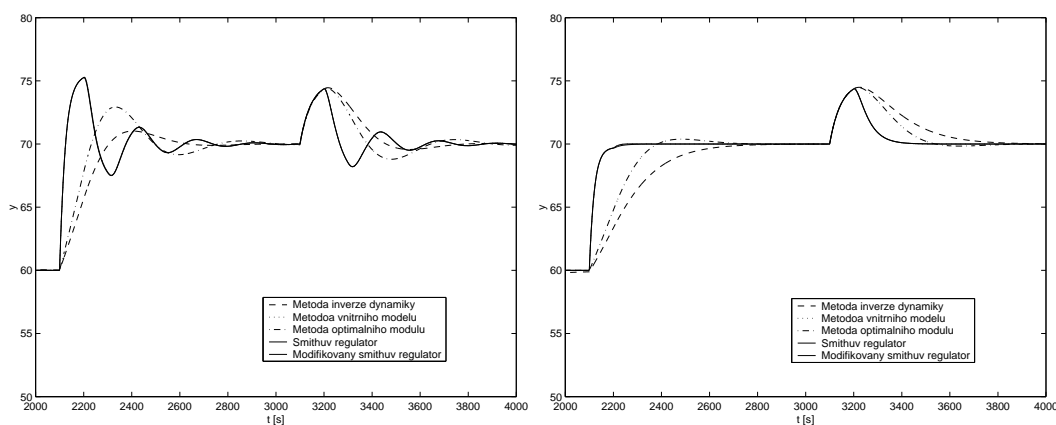
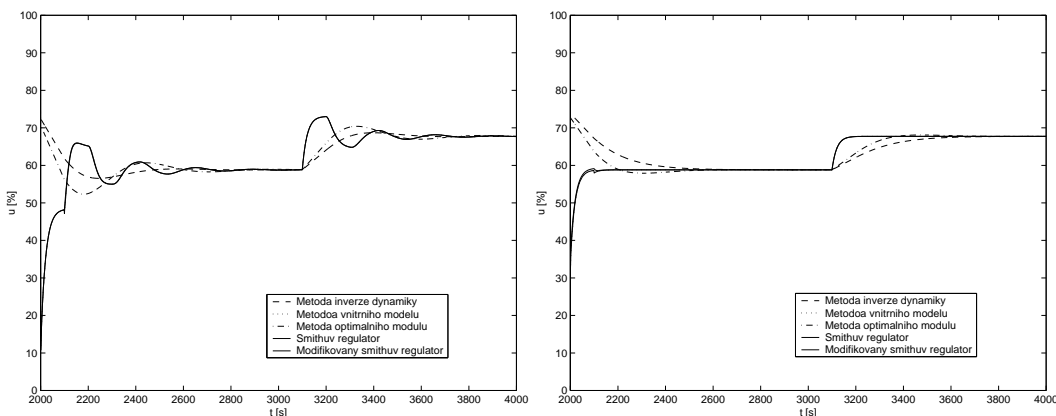
Obrázek 4.21 - Srovnání regulátorů

Obrázek 4.20 - Srovnání regulátorů navržených na soustavu 1. řádu s dopravním zpožděním se směšováním, kde inverzní směšovací charakteristika v regulátoru odpovídá charakteristice v modelu (parametry reg. viz Tabulka 4.1 – 3)

navržených na soustavu 1. řádu s dopravním zpožděním se směšováním, kde inverzní směšovací charakteristika v regulátoru je aproximována funkcí \arcsin (4-1) (parametry reg. viz Tabulka 4.1 – 3)

Největší chyby se dopouštíme při použití aproximace přímkou č.1 rovnice (4-2), která je sice nejjednodušší na realizaci, ale výsledky nejsou uspokojivé. Kmitavá odezva regulované veličiny je vidět na *Obrázku 4.22*.

Nejlépších výsledků dosáhneme aproximací přímkou č.2 podle rovnice (4-3), která nejlépe prokládá lineární část směšovací charakteristiky. Pokud je pracovní bod směšovacího ventilu v této oblasti, nejlépe ve středu lineární části, dosáhneme s ním téměř totožných výsledků jako se skutečnou směšovací charakteristikou. Průběh je na *Obrázku 4.23*.

Regulovaná veličina $y(t)$:Akční veličina $u(t)$:

Obrázek 4.22 - Srovnání regulátorů
navržených na soustavu 1. řádu s dopravním zpožděním se směšováním, kde inverzní směšovací charakteristika v regulátoru je aproximována přímkou č.1 (4-2) (parametry reg. viz *Tabulka 4.1 – 3*)

Obrázek 4.23 - Srovnání regulátorů
navržených na soustavu 1. řádu s dopravním zpožděním se směšováním, kde inverzní směšovací charakteristika v regulátoru je aproximována přímkou č.2 (4-3) (parametry reg. viz *Tabulka 4.1 – 3*)

Na *Obrázku 4.20* je pro srovnání průběh regulované a akční veličiny, kde inverzní směšovací charakteristika v regulátoru odpovídá skutečné směšovací charakteristice soustavy.

Linearizace, rovnicí (4-3), dosahuje dobrých výsledků, téměř jako se skutečnou směšovací charakteristikou. Pro její jednoduchou implementaci, ji použijeme i při řízení reálné soustavy. Také je ovšem důležitá správná poloha pracovního bodu, nejlépe uprostřed lineární části směšovací charakteristiky směšovacího ventilu (asi 60 % otevření ventilu). To zajistí nejlepší využití rozsahu otevření směšovacího ventilu při regulaci.

4.6 Přehled nastavení parametrů regulátorů při simulacích

U každého předešlého *Obrázku* simulovaných průběhů naleznete číslo odpovídající označení nastavení parametrů simulovaných regulátorů v *Tabulce 4.1- x*.

Označení	Přenos regulované soustavy	Metoda návrhu regulátoru	Parametry regulátoru				
			k_P	T_I	T_D	T_F	T_W
1	$G(s) = \frac{0.985}{(46.2s + 1)} e^{-35s}$	Inverze dynamiky	0.493	46.2	-	-	-
		Optimální modul	0.670	46.2	-	-	-
		Vnitřní model	-	-	-	20	-
		Smithův reg.	2.345	46.2	-	-	20
		Mod. Smithův reg.	2.345	46.2	-	-	20
2	$G(s) = \frac{0.985}{(27.6s + 1)^2} e^{-20s}$	Inverze dynamiky	1.031	55.2	13.8	-	-
		Optimální modul	1.401	55.2	13.8	-	-
		Vnitřní model	-	-	-	27.6	-
		Smithův reg.	1.401	55.2	13.8	-	40
		Mod. Smithův reg.	1.401	55.2	13.8	-	40
3	$G(s) = \frac{0.985}{(46.2s + 1)} e^{-100s}$	Inverze dynamiky	0.173	46.2	-	-	-
		Optimální modul	0.235	46.2	-	-	-
		Vnitřní model	-	-	-	20	-
		Smithův reg.	2.345	46.2	-	-	20
		Mod. Smithův reg.	2.345	46.2	-	-	20
4	$G(s) = \frac{0.985}{(27.6s + 1)^2} e^{-100s}$	Inverze dynamiky	0.206	55.2	13.8	-	-
		Optimální modul	0.280	55.2	13.8	-	-
		Vnitřní model	-	-	-	27.6	-
		Smithův reg.	1.401	55.2	13.8	-	40
		Mod. Smithův reg.	1.401	55.2	13.8	-	40

Tabulka 4.1 – Přehled nastavení parametrů regulátorů použitých v simulacích

5 Realizace regulátoru programovatelným automatem

Díky programovatelným automatům, které v posledních desetiletích prošly velkým vývojem, lze softwarově realizovat téměř jakýkoliv řídicí algoritmus. A tak je možné efektivněji regulovat i soustavy s dominantním dopravním zpožděním, které mají větší nároky na řídicí algoritmus.

V této kapitole nejprve popíšeme modulární systém Modicon Quantum, do kterého následně naprogramujeme dvě nejvhodnější regulační metody pro řízení zadané soustavy s velkým dopravním zpožděním směřováním, Smithův a modifikovaný Smithův prediktivní regulátor. V poslední části ověříme funkčnost obou regulačních metod a programů na modelu soustavy.

5.1 Modulární systém Modicon Quantum

Regulaci zadané soustavy řešíme modulárním systémem Modicon Quantum (s použitím literatury [9] a [10]), který byl zapůjčen firmou Schneider Electric. Tato firma úzce spolupracuje se zadávající firmou, této diplomové práce, Warmnis Liberec, jenž tyto systémy využívá k řešení projektů.

Jedná se o plně programovatelný systém, lze jím realizovat téměř jakýkoliv řídicí algoritmus. Popis jednotlivých modulů je v *Tabulce 5.1*. Srdcem řídicí jednotky je 16-ti bitový procesor Intel 186 s 256KB operační pamětí. K dispozici máme osm analogových vstupů a čtyři analogové výstupy. Jednotlivé moduly jsou umístěné na základní desce s 10 sloty, propojené sběrnici. Ke komunikaci s PC lze využít sériové rozhraní Modbus nebo Ethernetový modul.

K programování řídicí jednotky slouží programovací software Concept XL verze 2.2. Tento software podporuje všech pět programovacích jazyků specifikovaných standardem IEC 61131-3. Podporované jazyky jsou: funkční blokové diagramy (FBD – programuje se zde nastavením parametrů a vazeb bloků s vybranou funkcí), kontaktní schéma (LD – obdoba liniového schéma, programuje se pomocí relé a spínačů, ...), sekvence funkčních bloků - Grafset (SFC – programuje se definováním objektů a jejich propojením v sekvenčním řízení), instrukční seznam (IL – programování instrukcemi v textové formě) a strukturovaný text (ST – obdoba jazyka Pascal). Jednotlivé části naprogramované

i různými jazyky lze kombinovat. Concept má rozsáhlé knihovny s definovanými bloky funkcí, které lze v jednotlivých programovacích editorech využít.

My využijeme hlavně programování pomocí funkčních bloků (FBD), pro regulaci, a strukturovaného textu (ST), pro výpočet a adaptaci parametrů modelu.

CPU 113 02 Controller	Procesor Intel 186, 20MHz, RAM 256 kB, Modbus, Modbus Plus
CPS 111 00 PS 115/230 VAC	Zdroj energie, vstup napětí/proud ~115V/0.4A nebo ~230V/0.2A, 50 Hz, výstupní proud 0.3 - 3A
ACI 030 00 Analog In	Analogové vstupy, 8 kanálů, rozlišení 12 bitů, 4 - 20 mA nebo 1 - 5V
ACO 020 00 Analog Out	Analogové výstupy, 4 kanály, rozlišení 12 bitů, 4 - 20 mA
NOE 211 00 Ethernet TCP/IP	Ethernet TCP/IP, 1 kanál, kroucená dvoulinka, 10 Mb/s
XBP 010 00 Blackplane 10 Slot	Základní deska se sběrnici pro moduly Modicon Quantum, 10 pozic

Tabulka 5.1 – Popis modulů systému Modicon Quantum [8]

5.1.1 Analogové vstupy / výstupy regulátoru a jejich zapojení

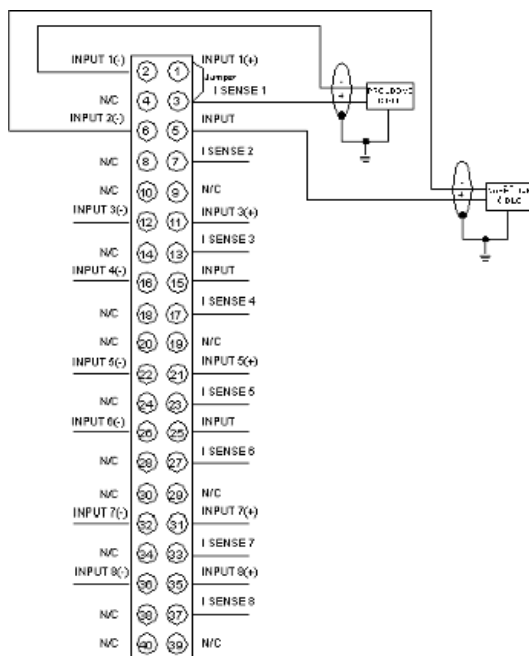
Modulární systém má 8 analogových vstupů a 4 analogové výstupy s rozlišením 12 bitů. Vstupy mohou být jak proudové (4-20 mA) tak i napěťové (1-5 V). Výstupy jsou jen proudové (4-20 mA). Ke čtení vstupních kanálů dochází po 3ms a k obnovování výstupu po 5ms.

Pro regulaci zadané soustavy, máme k dispozici měření teploty horké vody vystupující ze zdroje T_{OZdr} , teploty ochlazené vratné vody na vstupu do kotle T_{IZdr} , teploty ve vzdáleném odběrovém místě T_{IVym} a objemového toku m . Všechny čidla se připojí přímo na proudové vstupy 4 až 20 mA (nebo napěťové 1 – 5 V) modulárního systému, podle *Obrázku 5.1*. Proudový rozsah odpovídá měřenému rozsahu veličin. U teploty tento rozsah předpokládáme 0° až 150° C a u průtoku 0 až 250 m³/h. Jako další vstup do regulátoru je žádaná hodnota W teploty vody v odběrovém místě, také v rozsahu 0° až 150° C. Výstupem z regulátoru je akční veličina U , kterou se nastavuje otevření třicestného ventilu. Výstup je proudový,

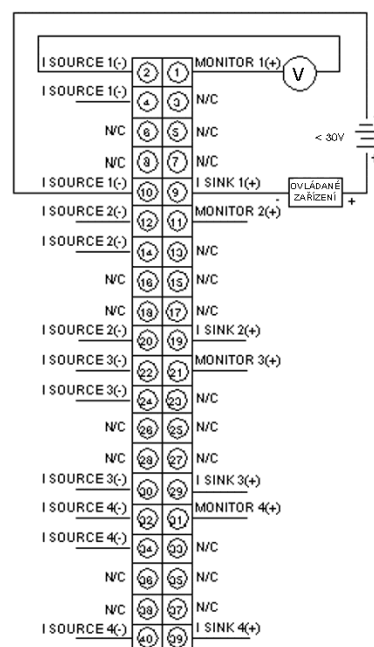
v rozsahu 0 až 20 mA odpovídající 0 až 100 % otevření ventilu, zapojení analogového výstupu je na *Obrázku 5.2*.

Měření teplot T_{OZdr} a T_{IZdr} slouží k adaptování regulátoru na rozsah teplot, které je možné dostat na výstupu směšovacího ventilu. Toto umožní regulaci i při změně odběru tepla – což má za důsledek změnu teplot na vstupech směšovacího ventilu. To se děje změnou hodnot parametrů v aproximované přímce (4-3) směšovací charakteristiky.

Měření průtoku m je k poměrně přesnému určení dopravního zpoždění na teplotném médiu, které je významně závislé na tomto průtoku, podle vztahu (2-1).



Obrázek 5.1 – Zapojení svorkovnice modulu 140 ACI 030 00 analogových vstupů, podle [8]



Obrázek 5.2 – Zapojení svorkovnice modulu 140 ACO 020 00 analogových výstupů, podle [8]

5.1.2 Konfigurace řídicí jednotky 140 CPU 113 02 v Conceptu XL

Před samotnou konfigurací je nutné do řídicí jednotky zavést spouštěcí soubor QIECv222.bin pomocí ExecLoaderu v Conceptu, který v sobě obsahuje podporu pro knihovny funkčních bloků (DFB). Tyto knihovny dále využíváme v programu regulátoru.

Konfiguraci systému provedeme v *Configuratoru* (v Conceptu po založení nového projektu), kde nastavíme typ řídicí jednotky Quantum 140 CPU 113 02S, a namapujeme analogové vstupy / výstupy do paměti, kde se každý modul, který máme k dispozici, přiřadí slotu podle jeho umístění na sběrnici. Jako na *Obrázku 5.3*. Dále v *Loadables* zavedeme podporu pro výpočty s pohyblivou řádovou čárku *EMUQ V196*.

Rack-Slot	Module	Detected	In Ref	In End	Out Ref	Out End	Description
1-1	CPS-111-00						AC PS 115/230V 3A
1-2	CPU-x13-0x						CPU 1xMB+
1-3	ACI-030-00		300001	300009			AN IN 8CH UNIPOLAR
1-4	ACO-020-00				400001	400004	AN OUT 4CH CURR

Obrázek 5.3 – Seznam modulů a namapování analogových vstupů / výstupů do paměti

Po připojení systému a navázání spojení, nahrajeme nastavení pomocí příkazu *Download* v menu Conceptu.

Chceme-li pro komunikaci s řídicí jednotkou využívat Ethernetový modul, musí se nastavit v *Configuration Extensions* hodnotu *TCP/IP* na 1 a pak přidat Ethernetový modul v seznamu modulů. Nám stačí komunikace přes Modbus.

5.2 Programová realizace regulačních metod

Do modulárního systému programově realizujeme Smithův a modifikovaný Smithův regulátor, které vykazují nejlepší výsledky při simulacích. Smithův regulátor v některých případech simulací byl i lepší (rychlejší, bez velkých překmitů), zato modifikovaný Smithův regulátor má jednodušší strukturu a méně nastavovaných parametrů, což v praxi je výhodou.

Oba programy jsou rozděleny do dvou částí, první je část vlastního regulátoru, který je naprogramován v FBD (pomocí funkčních bloků), a druhá část slouží k adaptaci parametrů (dopravního zpoždění a linearizované směšovací charakteristiky) na změny soustavy, naprogramována v ST (strukturovaným textem).

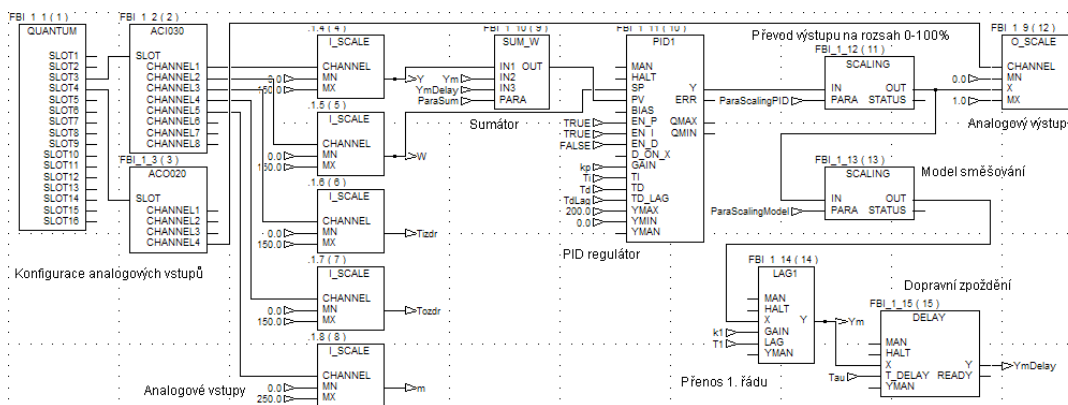
Na první kanál vstupního analogového modulu je připojeno čidlo měřící teplotu regulované teploty T_{IVym} , na druhý žádaná hodnota této teploty, na třetí teplota vratné vody T_{IZdr} , na čtvrtý teplota horké vody T_{OZdr} a na pátém měříme objemový průtok vody potrubím.

Oba programy se nachází na příloženém CD v adresáři *\Programy pro Quantum v Concept 2.2 XL SR2*.

5.2.1 Smithův prediktivní regulátor

Na *Obrázku 5.4* je schéma Smithova prediktoru realizované v Conceptu XL 2.2 ve FBD editoru, programované pomocí funkčních bloků. Bloky jsou provázány vzájemnými vazbami. Struktura Smithova regulátoru je obdobná jako na *Obrázku 3.9*. Hlavním řídicím prvkem je PI regulátor - blok *PID1*, u kterého je nutné nastavit jeho parametry uložené jako konstanty k_p , T_i , T_d . *LAG1* je přenos soustavy 1. řádu, kde se nastavuje zesílení k_l a časová konstanta T_l . Blok *DELAY* plní funkci dopravního zpoždění, které je v proměnné τ , hodnota dopravního zpoždění se přepočítává každých 30 min. (interval lze měnit změnou konstanty $TimeP$) podle změny průtoku. Přepočítávání je realizováno v editoru ST, na *Obrázku 5.5*.

SUM_W má funkci váženého sumátoru s třemi vstupy, nastavovaných parametry v proměnné *ParaSum*.



Obrázek 5.4 – Schéma realizace Smithova prediktivního regulátoru v editoru funkčních bloků

FBD v Conceptu XL v. 2.2 SR2, odpovídající struktuře na *Obrázku 3.9*

Bloky *SCALING* přepočítávají hodnoty podle linearizované směšovací charakteristiky. První blok, s parametry *ParaScalingPID*, převádí výstupní teplotu z PID na akční zásah v rozsahu 0 až 100% otevření ventilu. Druhý blok, s parametry *ParaScalingModel*, nahrazuje model směšovacího ventilu (převod otevření ventilu na teplotu vody za směšovacím ventilem). Oba bloky se každých třicet minut nastavují podle teplot horké a vratné vody, *Obrázek 5.5*.

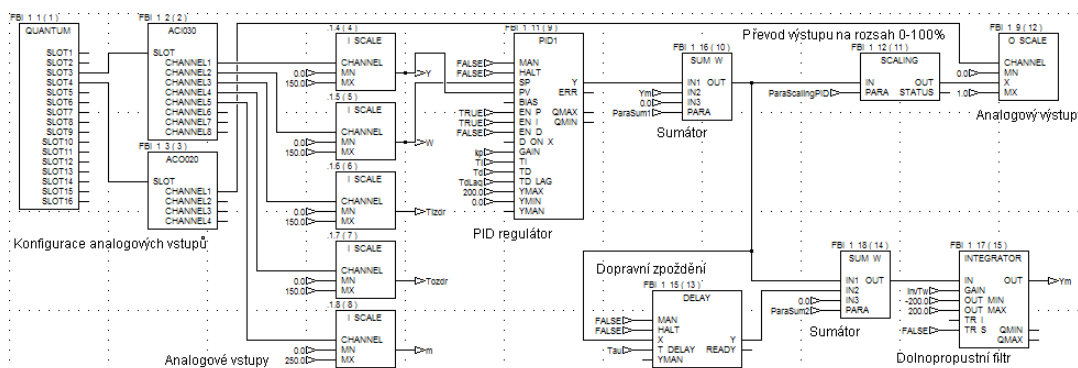
U bloků *I_SCALE* se musí nastavit rozsah vstupních hodnot (měřených teplot, průtoku), které náleží analogovým vstupům 4 – 20 mA (nebo 1 – 5 V). Blok *O_SCALE* převádí výstupní hodnotu otevření ventilu na proudový analogový výstup v rozsahu 4 - 20 mA.

Obrázek 5.5 - Adaptace parametrů Smithova prediktivního regulátoru v editoru strukturovaného textu ST v Conceptu XL v. 2.2 SR2

- Parametry PI regulátoru k_p , T_i
- Parametry modelu soustavy k_l , T_l , (Tau se nenastavuje, automaticky se spočítá programem z měřeného průtoku a parametrů L a DN)
- Parametry potrubí mezi směšovačem a odběrovým výměníkem L (délka potrubí) a DN (světlost potrubí), nutné pro výpočet dopravního zpoždění
- Parametry převodních funkcí nahrazující směšovací charakteristiku, $ParaScalingModel.in_min$ odpovídá zavření ventilu (v tomto případě 0.23) a $ParaScalingModel.in_max$ odpovídá otevření ventilu (v tomto případě 0.88), další parametry se načtou z měřených teplot T_{izdr} a T_{ozdr}
- Rozsahy MN a MX hodnot měřených veličin v blocích I_SCALE

U modifikovaného Smithova prediktivního regulátoru nemáme model regulované soustavy v jeho struktuře, oproti původnímu Smithova prediktivního

regulátoru. Struktura modifikovaného Smithova prediktivního regulátoru je znázorněna na *Obrázku 3.12*. Realizovaný regulační program pro Modicon Quantum je na *Obrázku 5.6*. Model regulované soustavy je nahrazen dolnoproputním filtrem, realizovaný blokem *INTEGRATOR*, s dopravním zpožděním, *DELAY*. U bloku *INTEGRATOR* je nutné nastavit jeho zesílení *InvTw* (což je vlastně časová konstanta T_w^{-1}). Ostatní bloky mají stejnou funkci jako u Smithova prediktivního regulátoru.



Obrázek 5.6 – Schéma realizace modifikovaného Smithova regulátoru v editoru funkčních bloků

FBD v Conceptu XL v. 2.2 SR2, odpovídající struktuře na *Obrázku 3.12*

Adaptaci parametrů bloku *SCALING* a dopravního zpoždění *DELAY*, zajišťujeme opět výpočtem každých 30 min. (*TimeP*), *Obrázek 5.7*.

[illegible]

Obrázek 5.7 - Adaptace parametrů modifikovaného Smithova regulátoru v editoru strukturovaného textu ST v Conceptu XL v. 2.2 SR2

Při použití modifikovaného Smithova regulátoru pro reálnou soustavu je důležité nastavit:

- Parametry PI regulátoru k_p, T_i

- Parametr $invTw$ (časová konstanta T_W^{-1}) (Tau u bloku DELAY se nenastavuje, automaticky se spočítá programem z měřeného průtoku)
- Parametry potrubí mezi směšovačem a odběrovým výměníkem L (délka potrubí) a DN (světlost potrubí), pro výpočet dopravního zpoždění
- Rozsahy MN a MX hodnot měřených veličin v blocích I_SCALE

5.3 Ověření regulátorů řízením modelu soustavy

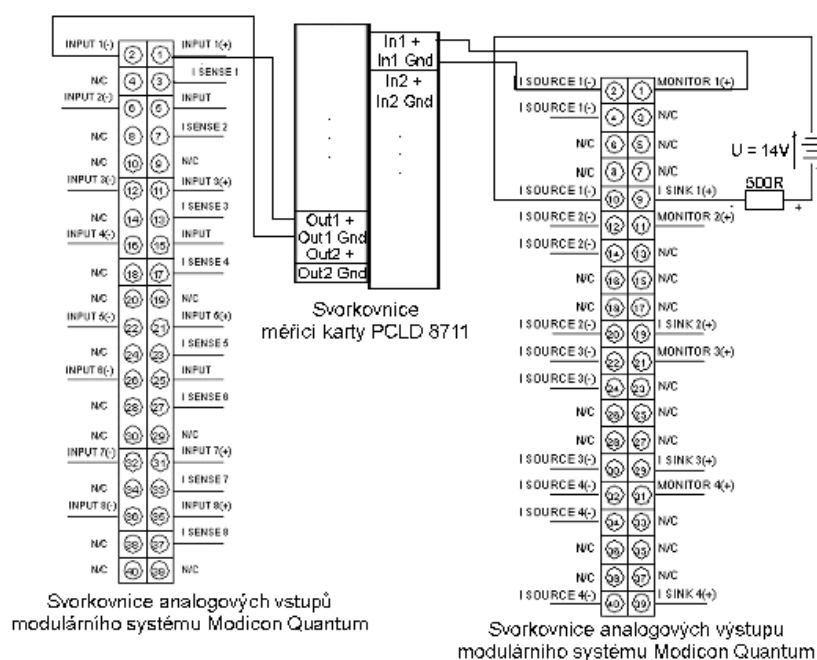
Pro ověření správné funkčnosti a nastavení obou naprogramovaných regulátorů jsme použili simulační prostředí Matlab Simulink a měřicí kartu PCLD – 8710 připojenou k PC [10]. Na kartě jsme využili 1 analogový vstup (0 – 10 V) a 1 analogový výstup (0 – 10 V). Měřili jsme pouze regulovanou veličinu, ostatní měřené teploty a průtok jsme nastavili softwarově, kvůli omezení výstupů z měřicí karty (pouze 2). Výstupem z regulátoru byla akční veličina odpovídající otevření ventilu v procentech.

5.3.1 Model soustavy, nastavení a zapojení regulátoru

Simulační schéma modelu soustavy v Matlabu odpovídá identifikovanému podle *Obrázku 2.3*. Soustava je 1. řádu se zpožděním a řídí se směšovacím ventilem. Simulační schéma modelu vytvořené v Matlabu je na *Obrázku 5.9*.

Program pro regulátor Modicon Quantum a model soustavy v Matlabu s využitím měřicí karty se nachází na přiloženém CD v adresáři *\Simulace soustavy v Matlabu 5.3 s použitím měřicí karty*.

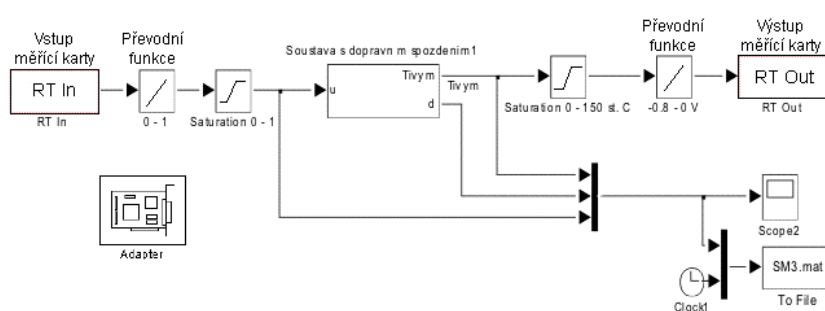
Analogový vstup a výstup modulárního systému Modicon Quantum jsme zapojili na vstup a výstup měřicí karty podle *Obrázku 5.8*.



Obrázek 5.8 – Zapojení svorkovnice modulárního systému

Modicon Quantum a měřicí karty PCLD 8711

Analogový výstup regulátoru je zapojen přímo na vstup měřicí karty, převod signálů $\langle 1V; 5V \rangle$ na $\langle 0V; 10V \rangle$ je realizován až v simulačním schéma v Matlabu, *Obrázek 5.8*. Pro převod analogového proudového výstupu ze systému na napěťový jsme využili informativní napěťový měřicí výstup regulátoru, jako řízené zařízení máme připojen 500Ω rezistor, zdroj jsme použili stejnosměrný s napětím 14V.



Obrázek 5.9 – Simulační schéma modelu soustavy s použitím měřicí karty PCLD 8710

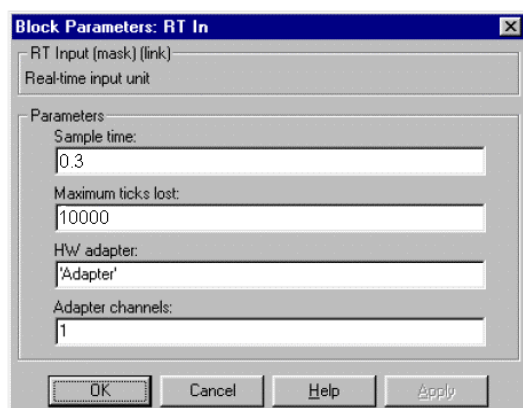
Pro real-time regulaci modelu je využit *Real-Time Windows Target Toolbox*, z kterého jsme vybrali blok *Adapter*, *RT In* a *RT Out*. V bloku adapter je nastaven typ měřicí karty *Pci1711*, v *RT In* vstupní kanál (*Obrázek 5.10*) a v *RT Out* výstupní kanál (*Obrázek 5.11*) z měřicí karty. Jelikož vstup a výstup z *RT In* a *Out*

v Matlabu je v rozsahu $\langle -1; +1 \rangle$, musíme proto převést signál pomocí převodní funkce, aby odpovídal vstupům a výstupům připojeného regulátoru, *Tabulka 5.2*.

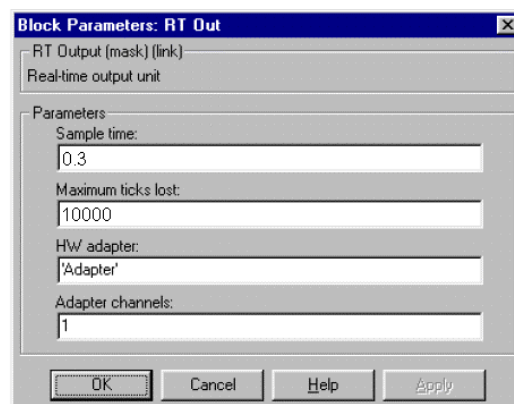
	Rozsah napětí signálu akční veličiny [V] (výstup regulátoru)	Rozsah odpovídajících hodnot v Matlabu	Skutečných rozsah akční veličiny
Vstup měřicí karty, akční veličina U	$\langle 1; 4.3 \rangle$	$\langle 0.09; 0.43 \rangle$	$\langle 0; 1 \rangle$

	Rozsah hodnot výstupu modelu regulované soustavy [$^{\circ}$ C]	Rozsah odpovídajících hodnot v Matlabu pro žádaný rozsah napětí	Požadovaný rozsah napětí signálu [V] (vstup regulátoru)
Výstup měřicí karty, regulovaná veličina Y	$\langle 0; 150 \rangle$	$\langle -0.8; 0 \rangle$	$\langle 1; 5 \rangle$

Tabulka 5.2 – Odvození hodnot pro převodní funkce signálů v simulačním schéma modelu
(na Obrázku 5.9)



Obrázek 5.10 – Nastavení bloku RT In,
vstupu měřicí karty PCLD – 8710



Obrázek 5.11 – Nastavení bloku RT Out,
výstupu měřicí karty PCLD – 8710

5.3.2 Ověření funkce regulátoru na modelu soustavy s dopravním zpožděním a směřováním

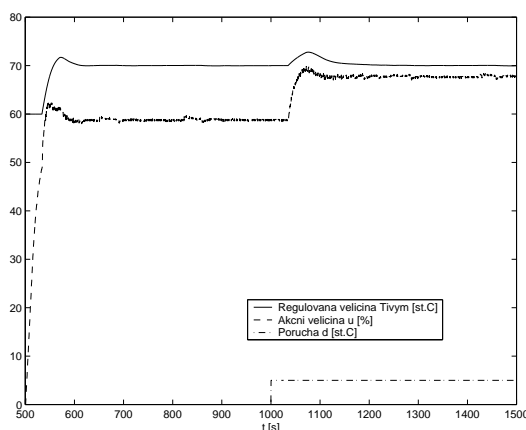
Model regulované soustavy v Matlabu odpovídá identifikované soustavě 1. řádu s dopravním zpožděním, které jsme nejprve ponechali 35s, pro první měření, a pak, pro další měření, ho zvýšili na 100s, abychom viděli chování regulačního pochodu při větším dopravním zpoždění. Parametry nastavení regulátoru a

regulované soustavy pro jednotlivé experimenty jsou v Tabulce 5.3, označení nastavení naleznete v popisku jednotlivých *Obrázků 5.12 až 5.15*.

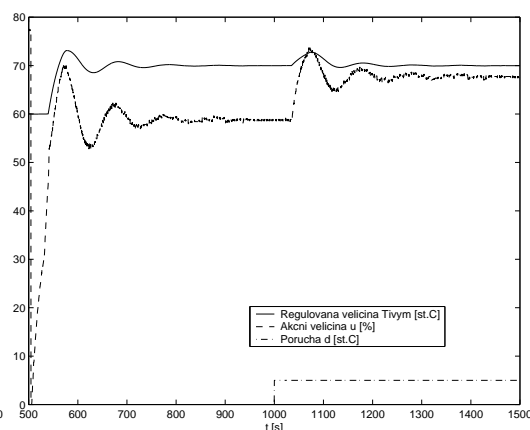
Při řízení jsme regulovanou veličinu soustavy nechali ustálit na žádanou hodnotu 60° C, v čase 500s jsme změnili žádanou hodnotu na 70° C. Poruchu simulujeme skokem z 0° na 5° C v čase 1000s. Naměřené průběhy jsou na následujících obrázcích (*Obrázky 5.12, 5.13, 5.14 a 5.15*).

Označení	DN [mm ²]	L [m]	k1 [-]	T1 [s]	Tau [s]	kp [-]	Ti [s]	Td [s]	invTw [s ⁻¹]	m [m ³ /s]	Tizdr [° C]	Tozdr [° C]
1	200	15	0.985	46.2	35	2.345	46.2	0	0.05	194	55	90
2	200	15	0.985	46.2	100	0.469	46.2	0	0.01	68	55	90

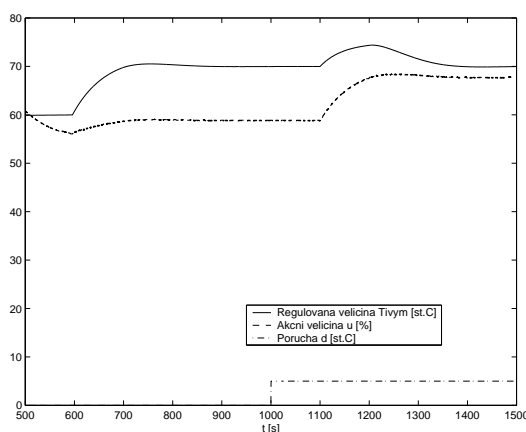
Tabulka 5.3 – Parametry nastavení regulátoru a modelu soustavy pro jednotlivá měření odpovídající *Obrázkům 5.12 až 5.15*



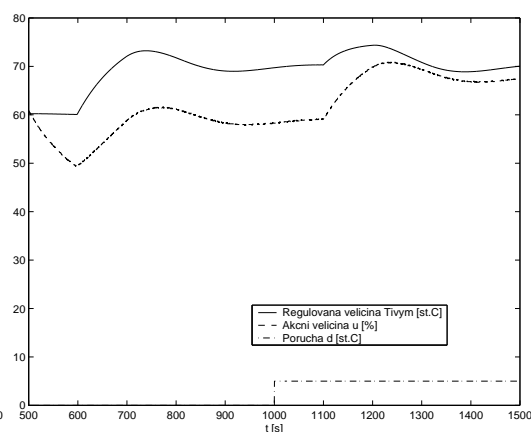
Obrázek 5.12 – Regulace modelu Smithovým regulátorem realizovaným v modulárním systému Modicon Quantum, pro $\tau = 35$ s a $T_w = 20$ s (parametry nastavení regulátoru a reg. soustavy v Tabulce 5.3 - 1)



Obrázek 5.13 – Regulace modelu modifikovaným Smithovým regulátorem realizovaným v modulárním systému Modicon Quantum, pro $\tau = 35$ s a $T_w = 20$ s (parametry nastavení regulátoru a reg. soustavy v Tabulce 5.3 - 1)



Obrázek 5.14 – Regulace modelu Smithovým regulátorem realizovaným v modulárním systému Modicon Quantum, pro $Tau = 100s$ a $T_w = 100s$ (parametry nastavení regulátoru a reg. soustavy v Tabulce 5.3 - 2)



Obrázek 5.15 – Regulace modelu modifikovaným Smithovým regulátorem realizovaným v modulárním systému Modicon Quantum, pro $Tau = 100s$ a $T_w = 100s$ (parametry nastavení regulátoru a reg. soustavy v Tabulce 5.3 - 2)

Pro menší dopravní zpoždění postačí u regulátorů i malá stavitelná časová konstanta T_w , ale při větším dopravním zpoždění je nutné zvýšit i T_w , kde by vznikali dosti velké nežádoucí překmity na regulované veličině. Při nastavování parametrů regulátorů je vhodné na tuto skutečnost brát zřetel.

Při regulaci modelu modulárním systémem Modicon Quantum se ukázalo, že modifikovaný Smithův regulátor vykazuje kmitavé odezvy na změnu žádané či poruchové veličiny, což není žádoucí. Smithův regulátor má hladší průběhy regulované veličiny, je vhodnější pro použití na reálnou soustavu.

V modelu jsme neuvažovali šum ani odchylky v modelu soustavy, proto průběhy v grafech jsou poměrně hladké. V případě kdy se žádaná hodnota bude měnit jen nepatrně jsou použitelné oba naprogramované regulátory.

6 Závěr

V této práci jsme se zabývali regulací soustavy s velkým dopravním zpožděním, které dosahuje i několika minut. Vytvořili jsme simulační model regulované soustavy, z naměřených průběhů na reálné soustavě, v simulačním prostředí Matlabu 5.3, kde se směřováním, horké vody na výstupu tepelného zdroje a ochlazené vratné vody, udržuje žádaná teplota ve vzdáleném odběrovém místě. Zde se ukazuje jako problematické přesné určení směšovací charakteristiky ventilu, kterou na reálné soustavě z technologických důvodů nelze odměřit. Tuto charakteristiku jsme proto určili experimentálně, tak aby odpovídala měření a předpokládanému charakteru. Tato charakteristika je nelineární, proto jsme provedli linearizaci vhodným zvolením pracovního bodu, v 60% otevření směšovacího ventilu. Na tuto identifikovanou soustavu jsme navrhli a simulacemi v Matlabu 5.3 ověřili vybrané struktury regulátorů vhodné pro soustavy s takto velkým dopravním zpožděním. Jedná se o PID regulátory metodou inverze přenosu soustavy a metodou optimálního modulu, dále regulátory obecné struktury metodou vnitřního modelu, Smithův prediktivní regulátor a modifikovaný Smithův prediktivní regulátor. Vyzkoušeli jsem také dvě modernější metody prediktivního řízení DMC (Dynamic Matrix Control, [5]) a GPC (Generalised Predictive Controller, [7]), které se ovšem projevovaly jako nevhodné pro řízení soustav s velkým dopravním zpožděním, větším než několik sekund, měli nestabilní odezvy (návrh těchto regulátorů v této práci neuvádíme).

Regulátory struktury PID se ukázali jako méně vhodné, jelikož mají příliš pomalé odezvy na změnu žádané nebo poruchové veličiny, zvláště pro velké dopravní zpoždění, které dosahuje více jak půl násobku doby náběhu, i když metody návrhu PID regulátorů jsou určeny pro soustavy s dopravním zpožděním. Mnohem lepších výsledků jsme dosáhli s regulátory obecné struktury. Všechny tři regulační metody (metoda vnitřního modelu, Smithův prediktivní regulátor a modifikovaný Smithův regulátor) měli při simulacích téměř totožné průběhy ve většině simulovaných stavech soustavy. Regulátor s vnitřním modelem, se ovšem projevil jako nejvíce náchylný na změny v simulovaném modelu, proto jsme pro softwarovou realizaci v modulárním systému Modicon Quantum zvolili Smithův

prediktivní regulátor a modifikovaný Smithův regulátor. Modifikovaný Smithův regulátor vykazoval v některých případech simulací překmity regulované veličiny, tyto překmity však nebyli příliš velké. Hlavní jeho výhoda se ukazuje při použití v praxi, oproti Smithovu prediktivnímu regulátoru, že se dá snáze experimentálně nastavit i bez předchozí přesné identifikace modelu soustavy. To u Smithova regulátoru je téměř nemožné, jelikož jeho struktura má šest nastavitelných parametrů (modifikovaný Smithův regulátor pouze tři odpovídajících přenosu PID struktury).

Oba programy jsou naprogramovány v softwaru Concept XL ver. 2.2 SR2 a nachází se na přiloženém CD. Do programu těchto dvou struktur regulátorů jsme implementovali adaptaci parametrů na změnu objemového průtoku vody potrubím, čímž se mění dopravní zpoždění soustavy (od 30 s až 4 min.), a také na změnu teplot horké vody a chladnější vratné, to se projeví změnou minimální a maximální teploty vody, kterou lze dosáhnout za směšovacím ventilem (změna parametrů převodní funkce výstupu regulátoru na rozsah 0 až 100% otevření ventilu).

Pro testování naprogramovaného modulárního systému Modicon Quantum jsme použili model soustavy vytvořený v Matlabu, připojený přes měřicí kartu PCLD-8710 v PC. Při regulaci jsme ověřili funkčnost obou programů a realizovaných regulátorů. Realizovaný Smithův regulátor měl hladší a rychlejší průběh regulované veličiny, při odezvě na změnu žádané hodnoty regulované veličiny a poruchové veličiny, než modifikovaný Smithův regulátor, který vykazoval delší dobu ustálení a kmitavou odezvu regulované veličiny. Jelikož změny žádané hodnoty regulované veličiny a poruchové veličiny nejsou v tomto případě příliš velké, jsou při řízení reálné soustavy použitelné oba realizované regulátory.

Bohužel se nepodařilo, před odevzdáním této práce, ověřit kvality obou naprogramovaných struktur regulátorů v systému Modicon Quantum na reálné soustavě, kde by se mohly projevit některé nedostatky, jako třeba vliv šumu na měřených signálech – následkem nežádoucí kmitání akční veličiny (implementovali bychom filtr šumu do programu, podle jeho charakteru), či

rychlost otevírání a zavírání směšovacího ventilu – při simulacích jsme uvažovali, že rychlost ventilu nemá vliv na regulační pochod.

Jako další řešení struktury regulátoru pro zadanou soustavu s velkým dopravním zpožděním by bylo možné realizovat metodu FSA (Finite Spectrum Assignment Control, [7]), která je modernější než uváděné metody a je také vhodná pro regulaci soustav s dopravním zpožděním, ale k této metodě se nám již nepodařilo sehnat dostatek popisující literatury.

7 Použitá literatura

- [1] Wagnerová, R. - Minář, M.: Učební texty - Syntéza regulačních obvodů. VŠB - TUO, 2000, přístupné na url: http://www.352.vsb.cz/uc_texty/Synteza/index.htm
- [2] Zítek, P. - Víteček, A.: Návrh řízení podsystémů se zpožděními a nelinearitami, monografie, vyd. ČVUT Praha, 1999, 165 str.
- [3] Vítečková, M.: Modifikace Smithova regulátoru. Sborník XXI. Semináře ASŘ '98, příspěvek č. 55, 1998, přístupné na url: <http://www.fs.vsb.cz/akce/1998/asr98/Sbornik/viteckov/viteckov.htm>
- [4] Schlegel, M. – Večerek, O.: Regulátory pro procesy s velkým dopravním zpožděním - Automa, číslo 12 / 2001, strana 12-16, přístupné na url: <http://www.automa.cz/>
- [5] Hlava, J.: Studijní materiály k přednáškám z předmětu Prostředky automatického řízení, TU Liberec, poslední aktualizace 5.5. 2003, přístupné na url: <http://www.fm.vslib.cz/~krtsb/fm/par/materialy.htm>
- [6] Modrlák, O.: Učební texty pro předmět Teorie řízení I a II, TU Liberec, 2003, přístupné na url: <http://www.fm.vslib.cz/~krt/krt/cz/vyuka/text.htm>
- [7] Huang, S. – Tan, K. K. – Lee, T. H.: Applied Predictive Control - Advances in Industrial Control, vyd. Springer London, ISBN 1-85233-338-3, 264 str.
- [8] Schneider Electric: Modicon Quantum - Automation platform, katalog duben 2003. Url firmy Schneider Electric: <http://www.schneider-electric.cz>
- [9] Schneider Automation GmbH: Concept Programming Unit, Ver. 2.2 XL SR2. Počítačový software pro programování PLC systémů firmy Schneider Electric, rok vydání této verze 2000.
- [10] Automation with PC's Advantech: Terminal wiring board PCLD – 8710, User's manual. Manuál k měřicí kartě PCLD – 8710.
- [11] The MathWorks: Matlab 5.3, The language of technical computing. Počítačový software určený pro výpočty a simulace, rok vydání této verze 1999. Url firmy MathWorks: <http://www.mathworks.com>

8 Popis adresářů obsažených na přiloženém CD

V adresářích na CD disku se nachází soubory k jednotlivým kapitolám této diplomové práce:

Blokové schéma regulované soustavy:

...\Blokové schéma regulované soustavy\

Identifikace modelu soustavy:

...\Identifikace modelu\

Návrh regulátorů a jejich srovnání:

...\Simulace regulátorů v Matlabu 5.3\

...\Simulace regulátoru v Matlabu 5.3 pro různé směšovací char\

Modulární systém Modicon Quantum:

...\Přehled modulů Modicon Quantum\

Programová realizace Smithova a modifikovaného Smithova prediktivního regulátoru pro Modicon Quantum v Concept 2.2 XL SR2:

...\Programy pro Quantum v Concept 2.2 XL SR2\

Ověření regulátorů naprogramovaných pro Modicon Quantum měřením na modelu soustavy s použitím měřicí karty:

...\Simulace soustavy v Matlabu 5.3 s použitím měřicí karty\

Text této diplomové práce:

...\Diplomová práce\